



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

TUHOST RAMENE PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU

STIFFNESS OF INDUSTRIAL ROBOT ARM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Vogel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Jan Vogel**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Tuhost ramene průmyslového robotu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je analýza jedné vybrané charakteristiky ramene průmyslového robotu, kterou je tuhost mechanické části konstrukce, která je proměnlivá v závislosti na silovém zatížení, která vzniká během operace vrtání. Diplomová práce je řešena ve spolupráci s MCAE Systems, s. r. o. Kuřim a ŠKODA AUTO a. s. Mladá Boleslav.

Cíle diplomové práce:

1. Popište proces vývoje aplikace průmyslového robotu opatřeného koncovým efektem v podobě vrtacího vřeteníku – elektrovřetenem pro proces vrtání.
2. Na základě analýzy technologického procesu vrtání do součástek elektrovřetenem, neseného na konci ramene průmyslového robotu, stanovte spektrum a velikost řezných sil.
3. Proveďte návrh měřicích míst na rameni robotu a postup (metodu) měření fyzikální veličiny odchylka skutečné polohy od polohy požadované.
4. Realizujte vlastní měření změny polohy měřených bodů na rameni robotu bez zatížení a se zatížením řeznými silami za pomoci optického skeneru.
5. Vyhodnoďte výsledky měření změny polohy ramene v prostoru bez zatížení a pod zatížením.
6. Nalezení optimální velikosti řezné síly při operacích vrtání tak, aby deformace ramen byla minimální a současně, aby vznikající chvění z řezného procesu bylo také minimální, s ohledem na předepsanou přesnost rozměru vrtaného otvoru.
7. Závěr a doporučení pro aplikaci v praxi.



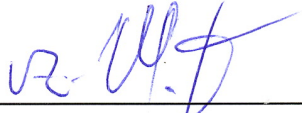
Seznam literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně – nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

ZELENKA, Antonín, Luděk VOLF a Antonie POSKOČILOVÁ. Projektování výrobních systémů: návody na cvičení. Vyd. 1. v Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 9788001043943.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 14. 11. 2016

		
_____ doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. ředitel ústavu		_____ doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Analýza tuhosti ramene průmyslového robotu s lineární kinematikou při operaci vrtání za pomoci optického skeneru. Nalezení optimální velikosti řezné síly pro vrtání tak, aby deformace ramen byla minimální a zároveň, aby vznikající chvění od řezného procesu bylo také minimální.

ABSTRACT

Stiffness analysis of an arm of an industrial robot with linear kinematics during a drilling operation. For solving this problem are used optical scanners. Finding the optimal cutting force for drilling by criterions: minimal deformation of robots arms and, at the same time, the emerging vibration from the cutting process is also minimal.

KLÍČOVÁ SLOVA

průmyslový robot, tuhost, vibrace, přesnost vedení po dráze, řezná síla, vrtání, optický skener

KEYWORDS

Industrial robot, stiffness, vibration, path repeatability, cutting force, drilling, optical scanner

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Vogel, J. *Tuhost ramene průmyslového robotu*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2017, 117 s., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce panu doc. Ing. Radkovi Knoflíčkoví, Dr. za příkladné vedení, cenné připomínky, rady a motivaci. Dále bych chtěl poděkovat firmám MCAE Systems s.r.o. a ŠKODA Auto a.s. za umožnění práce na tomto problému. Zároveň děkuji zaměstnancům MCAE Systems s.r.o. za trpělivost, pomoc a odpovězení všech mých otázek a zaměstnancům ŠKODY Auto a.s. za pomoc při měření.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Knoflíčka, Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25.5.2017

.....

Vogel Jan

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	SPOLUPRÁCE.....	17
2.1	MCAE Systems s.r.o.....	17
2.2	ŠKODA Auto a.s.	18
3	PROCES VÝVOJE POUŽITÍ PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU PRO OPERACI VRTÁNÍ	19
3.1	Průmyslový robot.....	19
3.2	Robot ABB IRB 6700-150	20
3.3	Vrtací jednotka.....	21
3.4	Robot KUKA KR 60 HA.....	22
3.5	Rozbor pracoviště	22
4	ANALÝZA TECHNOLOGICKÉHO PROCESU VRTÁNÍ.....	23
4.1	Proces vrtání	23
4.2	Kmitání soustavy	25
4.2.1	Základní veličiny popisující kmitavý pohyb	25
4.3	Stanovení spektra a velikostí řezných sil	27
5	MĚŘÍCÍ SYSTÉMY	29
5.1	Pontos.....	29
5.2	Aramis.....	33
5.3	Tritop	34
5.4	DMG Microset VIO 20150 Linear	35
6	TUHOST	37
7	STATISTIKA	39
7.1	Vymezení pojmů.....	39
7.2	Etapy statistického zkoumání	39
7.2.1	Statistické zjišťování	39
7.2.2	Zpracování statistických údajů	40
7.2.3	Vyhodnocení zpracovaných údajů a jejich analýza.....	40
7.3	Chyby měření.....	40
7.3.1	Chyby hrubé	40
7.3.2	Chyby soustavné (systematické)	41
7.3.3	Chyby náhodné	42
7.4	Třídění statistických dat.....	42
7.5	Statistické charakteristiky	43
8	PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTŮ.....	45
8.1	Vymezení experimentu	45
8.2	Struktura experimentu.....	46
8.3	Kinematické veličiny	49
9	NÁVRH MĚŘICÍCH MÍST A METODY MĚŘENÍ	53
9.1	Metoda měření	53
10	VLASTNÍ MĚŘENÍ.....	63
10.1	Schéma pracoviště	63
10.2	Přípravné měření.....	63

10.3	Vrtání a jeho značení	65
10.4	Příprava robotu a měřících systémů pro měření	65
10.4.1	Měřící objemy a velikost bodů	65
10.5	Fotogrammetrie	66
10.6	Měření	67
11	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	69
11.1	Souřadný systém	69
11.2	Způsob vyhodnocení záznamů ze systému Pontos 1	71
11.2.1	Postup práce v softwaru Aramis Professional 2016	71
11.2.2	Skript	73
11.2.3	Vyhodnocení v MS Excel	74
11.2.4	Vibrace	75
11.2.5	Tuhost	78
11.3	Způsob vyhodnocení záznamů ze systému Pontos 2	79
11.4	Vyhodnocení záznamů kroutících momentů	80
12	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	83
12.1	Vyhodnocení tuhosti	83
12.2	Vyhodnocení vibrací	86
13	OPTIMÁLNÍ VELIKOST POSUVOVÉ SÍLY	89
13.1	Kritéria	89
13.2	Nalezení optimální hodnoty	91
14	ZÁVĚR	93
15	SEZNAM POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ A SOFTWARE	95
16	SEZNAM ZKRATEK A FYZIKÁLNÍCH ZNAČEK	99
17	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	101
18	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	103
18.1	Seznam tabulek	103
18.2	Seznam obrázků	103
19	SEZNAM PŘÍLOH	107

1 ÚVOD

Každá výrobní společnost se snaží snižovat výslednou cenu hotových výrobků nebo polotovarů při zachování nebo zvýšení kvality, aby obstály v konkurenčním prostředí na otevřeném trhu. Cestou k dosažení tohoto cíle je zvyšování efektivity, produktivity a výkonnosti vlastních výrobních i nevýrobních procesů. Trendem dnešní doby je automatizace výrobních pracovišť v souladu s obsahem Průmyslu 4.0. Aplikace průmyslových robotů velice ovlivňuje tento trend. Jejich zavádění na různorodá pracoviště v podniku vede ke snižování výrobních časů, mající za účinek zvýšení efektivity výroby.

Část z celkového počtu nasazených průmyslových robotů je v dnešní době zařazena do výrobního řetězce jako obsluha dalších strojů. Pokud ale z tohoto řetězce ve vhodných případech odebereme většinou několikanásobně dražší výrobní stroj a jeho práci odvede průmyslový robot, snížíme čas manipulace obráběné součásti do obráběcího stroje a odpadnou náklady na pořízování obráběcího stroje. Na druhou stranu průmyslové roboty nedosahují pracovní a geometrické přesnosti jako číslicově řízené obráběcí stroje, zejména obráběcí centra. Výsledná kvalita produkce by tedy nedosahovala požadované úrovně.

Ve smyslu zadání diplomové práce je snaha využít průmyslový robot k technologické operaci vrtání děr do materiálu EN JS-2070. Aby průmyslový robot pracoval jako výrobní prostředek v předepsaných tolerancích, tvaru a rozměru vrtaného otvoru dle předepsaného výrobního výkresu součásti, bude zajímavé zjistit, jakých tolerancí tvaru a rozměru robot, vybavený vrtacím vřetenem, reálně dosáhne.

Cílem této diplomové práce je analýza jedné vybrané charakteristiky ramene průmyslového robotu, kterou je tuhost mechanické části konstrukce. Ta je proměnlivá v závislosti na silovém zatížení, vznikajícím během operace obrábění vrtáním. Diplomová práce je řešena ve spolupráci s MCAE Systems, s. r. o. Kuřim a ŠKODA AUTO a. s. Mladá Boleslav.

Diplomová práce se bude zabývat měřením průmyslového robotu při operaci vrtání. Měření bude prováděno optickými skenery. Proběhne zhodnocení přesnosti vedení po dráze při zatížení různými reznými silami. Z tohoto zhodnocení bude dále vycházet výpočet celkové tuhosti robotu při různém zatížení. Dále budou zhodnoceny vzniklé vibrace a opotřebení nástroje při různých posuvových rychlostech nástroje. Poté bude použita vhodná metoda pro nalezení optimální posuvové síly pro vrtání.

Analýza tuhosti ramene průmyslového robotu může pomoci při budoucím plánování pohybu ramene robotu a optimalizaci obráběcích procesů robotem.

2 SPOLUPRÁCE

2.1 MCAE Systems s.r.o.

MCAE Systems je česká firma, jejímž prostřednictvím jsou ve stěžejních oblastech průmyslu úspěšně aplikovány nejmodernější 3D digitální technologie. Dlouhodobě sleduje nejnovější technologické trendy ve světě zaměřené na progresivní vývoj výrobků. [1]

Firma založená v roce 1995 sídlící v Kuřimi nedaleko Brna, stojí v čele průkopníků technologií pro 3D tisk, aditivní výrobu, 3D digitalizaci a CAD/CAM software v mnoha oblastech průmyslu. Patří k předním dodavatelům těchto technologií a veškeré technologie nabízí také jako služby. Poskytuje řešení firem Stratasys, GOM, MK Technology a Tebis. V roce 2013 firma otevřela druhou pobočku v Mladé Boleslavi, nedaleko závodu Škody Auto.

Firma se aktivně zúčastňuje všech důležitých veletrhů (MSV Brno a Nitra, FOR Industry Praha a jiné). Na obr. 1 je MCAE Systems na MSV Brno 2016. Ve firmě, v rámci školicího střediska, jsou pořádány technické semináře a další dílčí školení pro uživatele i pro širokou veřejnost.

MCAE Systems je všude tam, kde je potřeba vyvíjet, tvořit, konstruovat, testovat a vyrábět. [1]



Obr. 1) MCAE Systems na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně 2016

2.2 ŠKODA Auto a.s.

Je největší český výrobce automobilů. Dlouhodobě největší firma v České republice podle tržeb největší exportér a jeden z největších domácích zaměstnavatelů. Sídlo společnosti je v Mladé Boleslavi v severních Čechách. Další výrobní závody jsou ve Kvasinách a ve Vrchlabí. Vlastníkem Škody Auto je od roku 2007 společnost Volkswagen Finance Luxemburg S.A. se sídlem v Lucemburku. [2]

Historie Škody sahá až do roku 1905, kdy podnik Laurin & Klement začíná vyrábět první model automobilu. V roce 1925 dochází ke spojení se strojírenským koncernem Škoda. Za první a druhé světové války se podnik podílí na válečné výrobě a stává se součástí jiných společností. Historický název Škoda se vrací až roku 1990. Na obr. 2 je logo Škody Auto.



Obr. 2) Logo Škoda Auto [2]

3 PROCES VÝVOJE POUŽITÍ PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU PRO OPERACI VRTÁNÍ

3.1 Průmyslový robot

Robot je automatický nebo počítačem řízený integrovaný systém, schopný autonomní, cílově orientované interakce s přirozeným prostředím, podle instrukcí od člověka. Tato interakce spočívá ve vnímání a rozpoznávání prostředí a manipulování s předměty, popř. v pohybování se v tomto prostředí. [3]

Průmyslové roboty zařazujeme do výrobního řetězce z technických příčin:

- snížení výrobních časů
- práce v prostředí člověku nebezpečném
- nahrazení drahé pracovní síly
- náhrada za jiné stroje – např. robotické obrábění

Průmyslové roboty se sériovou kinematickou strukturou jsou v průmyslu využívány pro operace, které vyžadují dobrou opakovatelnost, ale ne nutně dobrou globální přesnost polohování (poloha + orientace, jak je definováno v normě ISO 9283) [14]. Významná role použití průmyslových robotů je tedy především kompletní manipulace s polotovary či hotovými výrobky – obsluha výrobních strojů. Průmyslový robot nahrazuje lidskou obsluhu. Vyjímá obrobené díly a ukládá je do určených pozic nebo odebírá polotovary ze zásobníku a vkládá je do čelistí stroje. Další možností je integrace průmyslového robotu do stroje, kde funguje jako výměník nástrojů nebo manipuluje s technologickými paletami v obráběcím centru. Lidská obsluha poté jen kontroluje proces výroby, popřípadě dodává polotovary k robotu či odváží hotové výrobky. Na takto automatizovaném pracovišti dochází k výraznému zvýšení časové i ekonomické efektivnosti využití. [5]

Dalším využitím průmyslových robotů je provádění jisté vybrané technologické operace. Jako koncový efektor na rameni robotu je použit nástroj příslušný dané operaci. Poměrně rozšířené je svařování robotem především v automobilovém průmyslu. Jako koncový efektor je použita svařovací hlavička. Dalším možným využitím je přímé obrábění, kdy je jako efektor použit přímo řezný nástroj nebo je na konec ramene připevněn další pohon s řezným nástrojem, např. vrtačka pro vrtání, bruska, frézka, ocelový kartáč pro čištění apod. [5] Výhodou takových použití je dosah průmyslového robotu. Na jedno upnutí obrobku je schopen obrobit rozměrné obrobky, složité tvary a kontury. Zásadní nevýhoda je v omezené tuhosti ramene průmyslového robotu. Při obrábění tvrdších materiálů dochází k velkým silám působících na nástroj. Proto se průmyslové roboty používají spíše pro obrábění měkčích materiálů jako je dřevo, plast, polystyren, apod. Dalším nedostatkem průmyslového robotu je, že se liší přesnost operací prováděných v blízkosti jeho základny od přesnosti u okraje jeho dosahu.

3.2 Robot ABB IRB 6700-150

Pro potřeby této diplomové práce je použita sedmá generace robustního robotu od společnosti ABB, typ IRB 6700-150, s angulární kinematickou strukturou (RRR). Robot je v provozu od ledna 2016. Výrobní štítek je v kapitole č. 15., pracovní prostor na obr. 4.

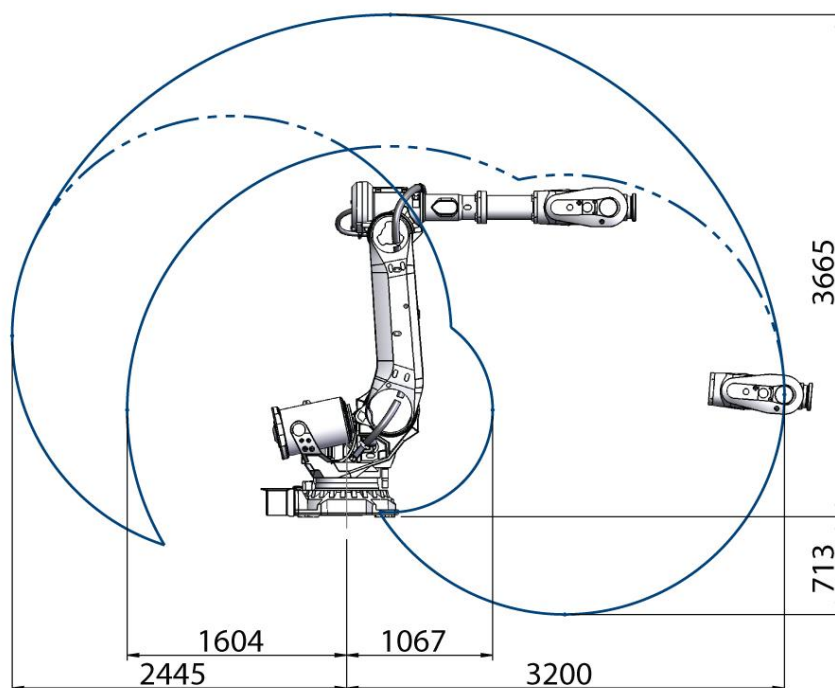


Obr. 3) Robot ABB IRB 6700-150 [4]

Tento robot má 6 stupňů volnosti. Jeho dosah činí 3,2 m a pracovní prostor je zobrazen na obrázku 1.2. Robot se upevňuje do podlahy, základnu tvoří obdélník o stranách 1004 x 720 mm. Vlastní hmotnost je asi 1200 kg podle vybavení. Robot je schopen manipulovat s předměty o hmotnosti do 150 kg. Opakovatelnost najetí na pozici je 0,06 mm a opakovatelnost vedení po dráze je 0,14 mm. Díky své robustní stavbě předem představuje vyšší tuhost. Jednotlivé základní technické parametry robotu jsou zobrazeny v tabulce 1.

Tab 1) Parametry robotu IRB 6700-150 [4]

Dosah ramene	3,20 m
Jmenovitá nosnost	150 kg
Těžiště od hlavní osy rotace	300 mm
Moment na zápěstí	1135 Nm
Opakovatelnost vedení po dráze	0,14 mm
Opakovatelnost najetí na pozici	0,06 mm
Rozměry základny	1004 x 720 mm
Hmotnost	1200 kg



Obr. 4) Pracovní prostor robotu IRB 6700-150 [4]

3.3 Vrtací jednotka

Robot ABB IRB-6700 je vybaven vřetenem od společnosti PDS GmbH. Vřeteno řady DynaLoc disponuje výkonem 7,5 kW, jeho hmotnost činí 26 kg a je chlazeno stlačeným vzduchem. Další štitkové údaje jsou uvedeny v kapitole 15 [21].



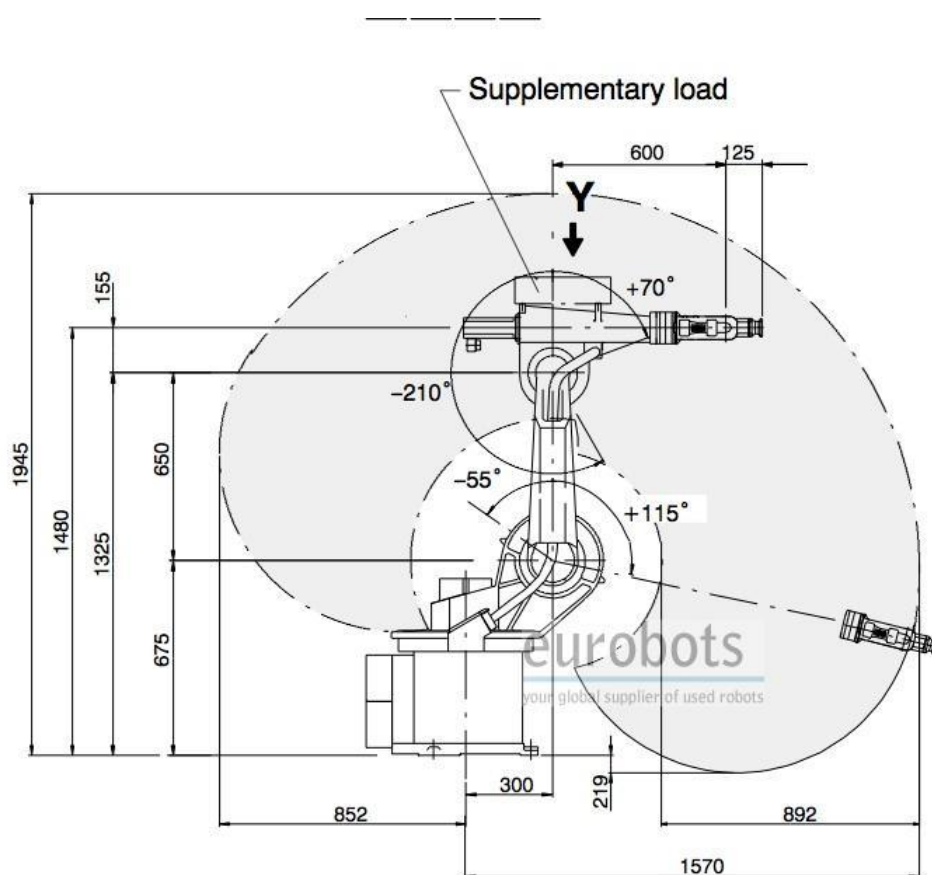
Obr. 5) Vrtací jednotka PDS GmbH [21]

3.4 Robot KUKA KR 60 HA

Na tomto typu průmyslového robotu proběhne přípravné měření v MCAE v Kuřimi. Robot je používán od roku 2009 v prostorách firmy MCAE, převážně na obráběcí operace. Na obr. 6 je znázorněn pracovní prostor robotu. Hlavní parametry robotu KUKA jsou v tab. 2 Výrobní štítek je v kapitole 15.

Tab 2) Parametry KUKA KR 60 HA

Jmenovité užité zatížení	60 Kg
Maximální celkové rozložené zatížení	95 Kg
Přesnost polohy - absolutní / opakovatelná	0,7 mm / 0,06 mm
Přesnost dráhy - absolutní / opakovatelná	1,4 mm / 0,2 mm



Obr. 6) Pracovní prostor robotu Kuka KR60

3.5 Rozbor pracoviště

Pracovištěm je uzavřená buňka o rozměrech asi 7x16 m téměř uprostřed haly nástrojárny ve Škodě Auto v Mladé Boleslavi. Pracoviště je vybaveno průmyslovým robotem ABB IRB-6700 na lineárním vedení. U robotu, podél vedení je pracovní stůl o velikosti asi 3x10 m. Průmyslový robot je vybaven systémem ForceControl.

4 ANALÝZA TECHNOLOGICKÉHO PROCESU VRTÁNÍ

4.1 Proces vrtání

Vrtání je po soustružení druhá nejčastější operace obráběním. Specifickou zvláštností je řezná rychlost měnící se podél ostří od maxima na obvodu nástroje až po nulovou rychlost v ose nástroje. Při procesu vrtání koná většinou hlavní rotační pohyb nástroj. Můžeme se setkat i s případy, kdy hlavní rotační pohyb koná obrobek, např. vrtání na soustruhu. Je to metoda, kdy dochází k vytváření díry zcela nebo ke zvětšování již předpracované díry (předvrtané, předlisované, předkované, atd.). Osa rotace nástroje (vrtáku) je zpravidla kolmá k obráběné ploše.

Vrtání můžeme rozdělit na:

- Navrtávání díry do plného materiálu
- Vrtání krátkých děr (poměr $D/L=1/5 \div 1/10$, kde D je průměr díry, L je délka díry) do plného materiálu
- Vrtání hlubokých děr (poměr $D/L > 1/10$) do plného materiálu
- Vrtání průchozích děr
- Speciální případy vrtání
- Vrtání do těžkoobrobitelných, kompozitních a nekovových materiálů

Základním parametrem při vrtání jsou rychlosti – řezná v_c , posuvová v_f a rychlost řezného pohybu v_e . Charakteristická vlastnost všech rotačních nástrojů na výrobu děr vrtáním je, že řezná rychlost se směrem k ose nástroje snižuje. V ose rotace na špičce vrtáku je tedy řezná rychlost nulová a na obvodě vrtáku má řezná rychlost nejvyšší hodnotu. Vztahy, které vyjadřují řeznou rychlost, posuvovou rychlost a rychlost řezného pohybu jsou následující [7]:

$$v_c = \pi \times D \times n \times 10^{-3} \text{ [m/min]} \quad (1)$$

$$v_f = f \times n \text{ [mm/min]} \quad (2)$$

$$v_f = \sqrt{v_c^2 \times v_f^2} = 10^{-3} \times n \times \sqrt{(\pi \times D)^2 + f^2} \text{ [mm/min]} \quad (3)$$

Kde: D [mm] je průměr obráběné díry

n [min^{-1}] jsou otáčky nástroje (případně obrobku)

f [mm] je posuv nástroje na jednu otáčku

V případech, kdy jsou nástroje vícebřité, platí následující vztah pro hodnotu posuvu na zub f_z .

$$f_z = \frac{f}{z} \text{ [mm]} \quad (4)$$

Kde: z [-] je počet zubů (břitů) nástroje

Při vrtání vzniká odpad – tříska. Parametry průřezu třísky jsou znázorněny na obr. 7 a platí vztah:

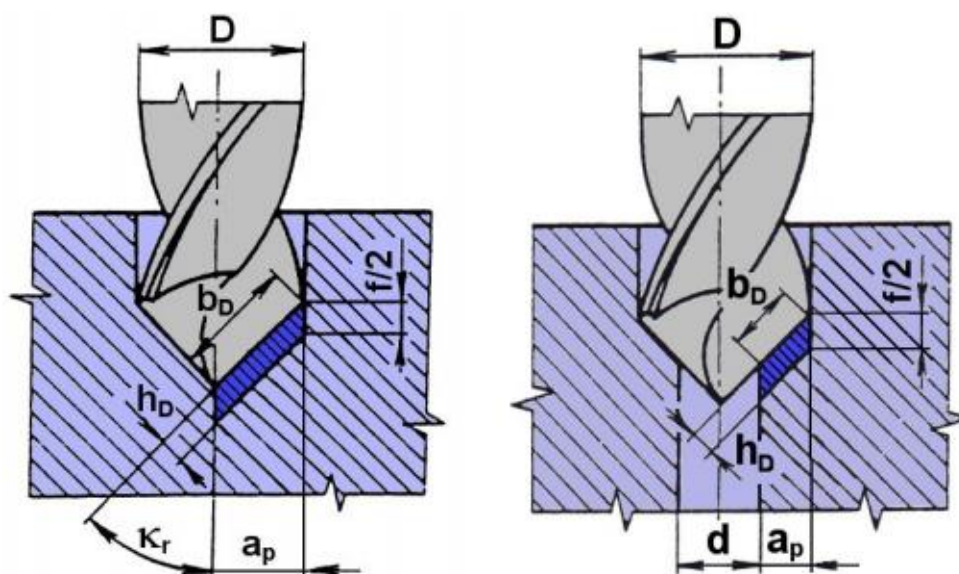
$$A_D = b_D \times h_D = a_p \times \frac{f}{2} [\text{mm}^2] \quad (5)$$

kde: b_D [mm] je jmenovitá šířka třísky

h_D [mm] je jmenovitá tloušťka třísky

a_p [mm] je šířka záběru ostří

f [mm] je posuv na otáčku



Obr. 7) Průřez třísky při vrtání dvoubřitým vrtákem [6]

Pro vrtání do plného materiálu pro výpočet šířky záběru ostří platí vztah: $a_p = D/2$

Pro vrtání do předpracované díry pro výpočet šířky záběru ostří platí vztah: $a_p = (D-d)/2$

Následným dosazením do rovnice průřezu třísky, vrtané do plného materiálu jedním břitem dostáváme vztah:

$$A_D = \frac{D \times f}{4} [\text{mm}^2] \quad (6)$$

Pro vrtání do předvrtané díry dostáváme vztah:

$$A_D = \frac{(D-d) \times f}{4} [\text{mm}^2] \quad (7)$$

Při vrtání šroubovým vrtákem se jednotlivé hodnoty parametrů průřezu třísky vypočítají podle těchto vztahů:

- jmenovitá tloušťka třísky

$$h_D = \sin \kappa_r \times \frac{f}{2} [\text{mm}] \quad (8)$$

- jmenovitá šířka třísky při vrtání do plného materiálu

$$b_D = \frac{D}{2 \times \sin \kappa_r} [\text{mm}] \quad (9)$$

- jmenovitá šířka třísky při vrtání do předpracované díry

$$b_D = \frac{D-d}{2 \times \sin \kappa_r} [\text{mm}] \quad (10)$$

4.2 Kmitání soustavy

Proces vrtání způsobuje vznik řezných sil, které mají velký vliv na jakost obrobku – způsobují kmitání. Průmyslový robot, obrobek a nástroj tvoří systém se složitými dynamickými charakteristikami a téměř vždy dochází ke kmitání. Kmitání má vliv na kvalitu obrobku, zvyšuje intenzitu opotřebení nástroje a snižuje životnost robotu (zvyšuje opotřebení jednotlivých součástí robotu). Kmitání rozdělujeme na vlastní, vynucené a samobuzené. [6]

Vlastní kmitání vzniká např. rázem – záběr nástroje. Vlastní kmitání se vlivem odporů utlumí a většinou lze zcela zanedbat.

Díky periodicky proměnlivé budící síle vzniká kmitání vynucené. V našem případě se bude jednat o kmitání způsobené nevyvážeností rotujících součástí a kmitání vyvolané vlastním řezným procesem.

Bez periodického vnějšího buzení vzniká kmitání samobuzené. Například náraz nástroje na tvrdší strukturální částici v obráběném materiálu dojde k impulzu, který vyvolá výchylku z rovnovážného stavu a kmitání dále probíhá bez přívodu další energie.

4.2.1 Základní veličiny popisující kmitavý pohyb

Hmota o hmotnosti m uložená na pružině o tuhosti k vykonává po svém vychýlení z rovnovážné polohy harmonický kmitavý pohyb. Když zanedbáme tlumení, kmitá hmota vlastní frekvencí $\Omega = \sqrt{k/m}$ a průběh výchylky je sinusový s amplitudou x_a . [20] Rovnice popisující kmitání:

$$x(t) = x_a \times \sin(\Omega t - \varphi) \quad (11)$$

kde	x_a	amplituda harmonického kmitání [m]
	Ω	vlastní kruhová frekvence [rad/s]
	φ	počáteční fázový úhel (je dán počáteční výchylkou)

V technické praxi se častěji, než kruhová frekvence používá frekvence **f [Hz]**.

$$f = \frac{\omega}{2 \times \pi} [\text{Hz}] \quad (12)$$

A její převrácená hodnota – perioda T:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2 \times \pi}{\omega} [\text{s}] \quad (13)$$

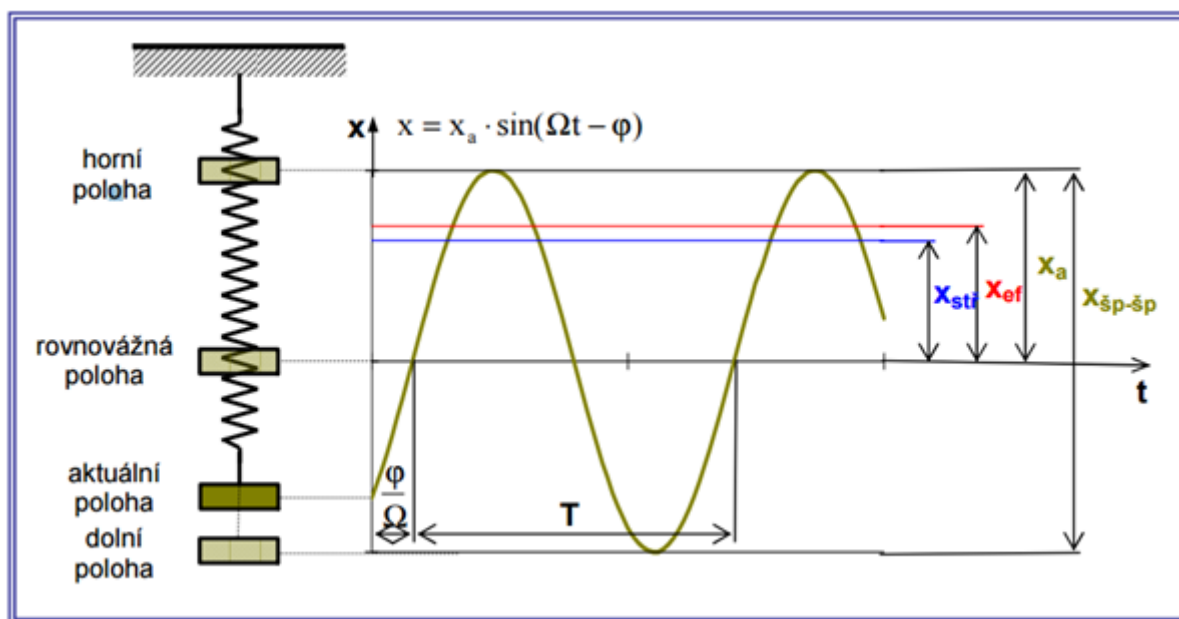
Místo amplitudy se pro popis kmitání může použít další charakteristiky:

efektivní hodnota = RMS (Root Mean Square) = $0,707 \times \text{amplituda}$ $x_{ef} = 0,707 \cdot x_a$

střední hodnota = $0,637 \times \text{amplituda}$ $x_{stř} = 0,637 \cdot x_a$

rozkmít (velikost špička-špička) = $2 \times \text{amplituda}$ $x_{šp-šp} = 2 \cdot x_a$

Veličiny jsou uvedeny na obrázku č. 8.



Obr. 8) Veličiny popisující harmonický pohyb [19]

U neharmonických signálů ztrácí pojem amplituda svůj smysl, ale nadále platí vztahy pro efektivní a střední hodnotu. V technické praxi je nejvíce vypovídající efektivní hodnota kmitání – RMS (root mean square). Tato hodnota bude použita pro vyhodnocení vibrací vznikajících při řezném procesu vrtání. Vztah pro efektivní hodnotu je vyjádřen následovně:

$$x_{ef} = x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (14)$$

4.3 Stanovení spektra a velikostí řezných sil

Při vrtání do materiálu vznikají řezné síly. Hlavní řeznou sílu můžeme obecně rozložit do třech složek – řezné F_c , posuvové F_f a pasivní F_p . V našem případě, kdy je použit šroubovitý vrták, který má dva symetrické břity, jsou výsledné síly tvořeny součtem nebo rozdílem hodnot na obou břitech nástroje (obr.9).[7] Platí tyto vztahy:

$$\text{Posuvová síla} \quad F_f = F_{f1} + F_{f2} \quad [\text{N}] \quad (15)$$

$$\text{Řezná síla} \quad F_c = F_{c1} + F_{c2} \quad [\text{N}] \quad (16)$$

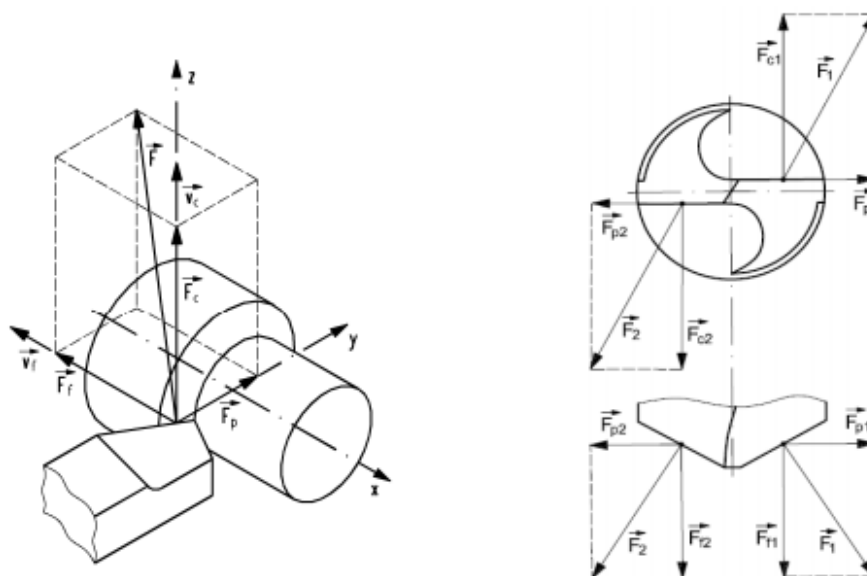
$$\text{Pasivní síla} \quad F_p = F_{p1} + F_{p2} \quad [\text{N}] \quad (17)$$

V případě správného a přesného naostření vrtáku, síly na obou břitech se rovnají a platí tyto vztahy:

$$\text{Posuvová síla} \quad F_{f1} = F_{f2} = F_f / 2 \quad [\text{N}] \quad (18)$$

$$\text{Řezná síla} \quad F_{c1} = F_{c2} = F_c / 2 \quad [\text{N}] \quad (19)$$

$$\text{Pasivní síla} \quad F_{p1} = F_{p2} = F_p / 2 \quad \Rightarrow \quad F_p = 0 \quad [\text{N}] \quad (20)$$



Obr. 9) a) Složky výsledné síly při obrábění [8] b) Složky sil na šroubovitém vrtáku [8]

Pro určení řezné síly můžeme vycházet z empirického vztahu:

$$F_c = C_{Fc} \times D^{x_{Fc}} \times f^{y_{Fc}} \quad [\text{N}] \quad (21)$$

- Kde C_{Fc} [-] je konstanta, vyjadřující zejména vliv obráběného materiálu
 x_{Fc} [-] je exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku,
 y_{Fc} [-] je exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.
 D [mm] je průměr vrtáku
 f [mm] je posuv na otáčku

Hodnoty C_{Fc} , x_{Fc} a y_{Fc} jsou empirické a většinou v sobě nezahrnují vliv obráběného materiálu, řezné podmínky nebo geometrii nástroje. Tyto hodnoty můžeme nalézt v odborné literatuře nebo v katalozích výrobců nástrojů.

Pro určení řezné síly můžeme také vycházet z měrného řezného odporu obráběného materiálu. Je definovaný jako síla ve směru hlavního řezného pohybu vztažená na jednotku průřezu třísky. Vztah pro měrnou řeznou sílu:

$$F_c = k_c \times A_D \text{ [N]} \quad (22)$$

kde k_c [MPa] je měrný řezný odpor obráběného materiálu.

5 MĚŘÍCÍ SYSTÉMY

5.1 Pontos

Pro měření deformací ramene předmětného průmyslového robotu (odchylky polohy měřících bodů) byl vybrán systém Pontos. Jedná se o 3D optický měřicí systém od německé společnosti GOM GmbH, který umožňuje sledování a následnou analýzu diskrétních bodů. Na rozdíl od konvenčních způsobů měření posunutí, představuje velice rychlý způsob měření. Pro lepší pochopení poskytuje i přímý záznam z kamer nebo vizualizace. Systém Pontos budeme značit jako Pontos 2.



Obr. 10) a) Pontos [1]

b) Pontos, stativ, počítač [1]

Jedná se o systém, složený ze dvou (stereo) kalibrovaných kamer na společné základně, spínaným LED osvětlením, stativu a počítače. Frekvence záznamu dosahuje až 500 snímků za vteřinu s rozlišením 1,3 Mpx (nebo i vyšších frekvencí s nižším rozlišením kamer). [1]

Systém snímá prostorové souřadnice libovolného počtu měřících bodů v kterémkoliv časovém okamžiku. Měřící (referenční) body jsou aplikovány na povrch měřeného objektu.

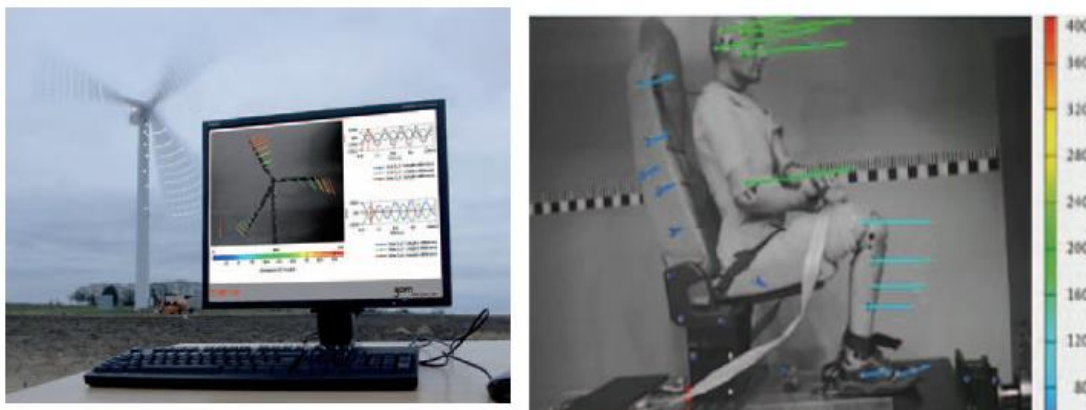
Systém Pontos může nahradit konvenční extenzometry, LVDT a akcelerometry. Díky rychlé a snadné změně měřícího objemu může být použit na objekty velikosti pohlednice až větrné elektrárny. Systém je virtuálně samomonitorující, tzn. při každém měření si sám kontroluje přesnost kalibrace.

Tento dynamický měřicí systém poskytuje tyto informace:

- 3D souřadnice
- 3D posunutí
- Deformace
- Rychlost
- Zrychlení

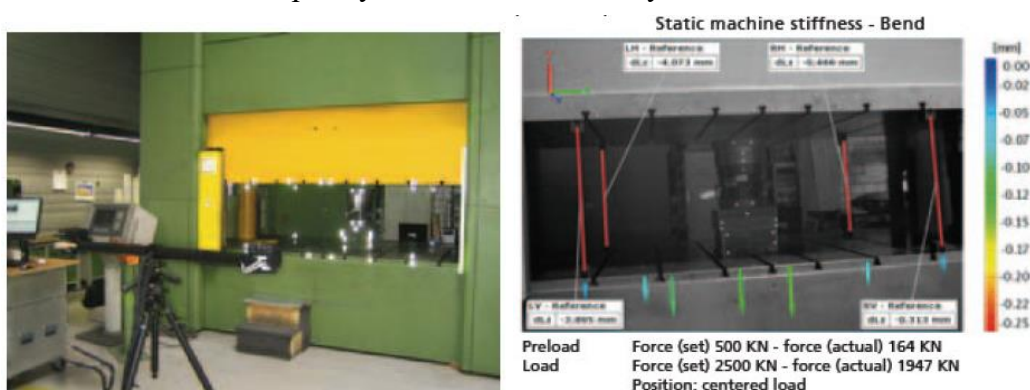
Mezi některé příklady použití patří například měření deformace větrné elektrárny. Vyhodnocovány byly vibrace, kroucení, ohýbání, rychlosti, zrychlení a trajektorie (obr.11a).

Při použití vysokorychlostních kamer je možné měřit rychlé procesy a pohybové sekvence (testování ve větrných tunelech nebo crash-testy).



Obr. 11) a) Měření větrné elektrárny [1] b) Crash-test[1]

Během procesu výroby můžeme uplatnit použití systému Pontos na dynamickou analýzu lisovacího nástroje. Při špatné kvalitě výrobků nesouvisí problémy jen se špatnými tvářecími nástroji. Nástroje můžeme rychle zkontrolovat pomocí 3D skenování a proložení naskenované sítě s CAD daty. Jako názorný příklad je jedna zakázka společnosti MCAE Systems. Výrobní parametry nebo vzájemné statické a dynamické působení lisu a nástroje (deformace, vibrace, zpětný ráz beranu atd.) byly naměřeny a vyhodnoceny systémem Pontos. Cílem měření bylo zjištění původu příčin špatných výrobků a optimalizace procesu tváření. Úloha byla rozdělena na statickou a dynamickou část. V první části byla posuzována statická tuhost stroje, měření průhybu a náklonu příčnicku, základové desky a rámu stroje po dobu působení síly. Ve druhé části se zjišťovala dynamická tuhost stroje online měřením, dále vibrace a rychlost. Výsledky pomohly nalézt správnou kombinaci rychlosti, tlaku a tvářecích sil pro vyhotovení kvalitních výlisků.



Obr. 12) Měření na tvářecím stroji systémem Pontos [1]

Hlavní vlastnosti:

- přesnost 0,05 mm při velikosti objektů (2×2×2) m³,
- počet 500 snímků za sekundu pro 1.3 Mpx rozlišení,
- při snížení velikosti snímku až 10 000 snímků za sekundu,
- možnost integrovat externí kamery se zápisem 30 000 snímků za sekundu,
- mobilní zařízení a bezkontaktní metoda.

Parametry systémy Pontos jsou v následující tabulce č.3:

Tab 3) Parametry Pontos [1]

Technical Data	
System Configurations	5 M / 4 M / 12 M / HS
Sensor Dimensions	typ. 700 x 200 x 140 mm ³
Weight	7 kg
Camera Resolution (5M)	2448 x 2050 pixels
Camera Resolution (4M)	2352 x 1728 pixels
Camera Resolution (12M)	4096 x 3072 pixels
Camera Resolution (HS)	1280 x 1024 pixels
Frame Rate	500 Hz at 1280 x 1024 pixels 1000 Hz at 1280 x 512 pixels ...
Measuring Volume	typ. 0.5 x 0.4 m ² up to 2.5 x 2 m ²
Accuracy	0.01 to 0.05 mm
Measured markers	unlimited
Power Supply	90-230V AC
Computer	Notebook or High End Rack mount PC
Transport Case	900 x 400 x 270 mm ³

Měřicí body

Pro lepší viditelnost a rozlišitelnost při vysokých rychlostech jsou měřicí body aplikované na povrch měřeného objektu opatřeny reflexní vrstvou. Tyto body osvětluje diodový blesk. Při měření se používají body:

- Kódované (obr. 13)
- Nekódované (obr. 14)

Každý kódovaný bod má svůj vlastní binární kód umístěný okolo středícího bodu. Tyto body jsou většinou magnetické. Body nekódované jsou menší a snadněji výrobitelné. Systém si musí nekódované body sám zakódovat vůči poloze kódovaných bodů nebo pomocí polohy bodů známých z předchozích měřících snímků.



Obr. 13) Kódované měřicí body

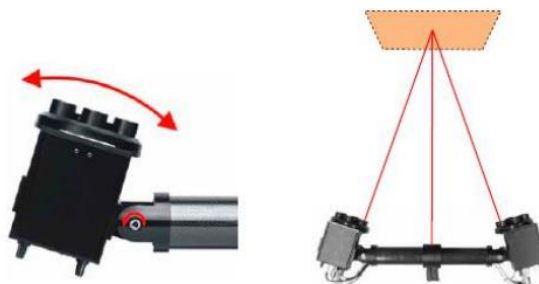


Obr. 14) Samolepící nekódované body a jejich aplikace

Příprava systému Pontos před měřením

Nejprve musíme určit přibližný objem prostoru, ve kterém se bude pohybovat měřený objekt. Poté v závislosti na měřeném objemu a vzdálenosti objemu od kamer určíme

z tabulek vzdálenost kamer mezi sebou. Dále je nutné nastavit úhel natočení kamer (pomocí laserových paprsků vedených z obou kamer a středu tyče (obr.15)).



Obr. 15) Obr. Natočení kamer

Dalším krokem je zaostření kamer, nastavení clon a kalibrace. Kalibrační kříž je složen ze dvou nosníků s pevně umístěnými a definovanými body. Kříž je na obr. 16.



Obr. 16) Kalibrační kříž

5.2 Aramis

ARAMIS je bezkontaktní optický systém pracující na principu digitální korelace obrazů (DIC), kterým lze měřit komponenty z jakéhokoliv materiálu. Nabízí osvědčené řešení pro analýzu deformací na povrchu testovaných objektů, a to v diskrétních bodech nebo celoplošně. Výsledkem je barevná mapa rozložení deformací na testovaném komponentu. Velikost měřícího rozsahu se pohybuje od několika milimetrů čtverečních až po několik metrů [1].

Systém Aramis bude použit pro stejnou funkci jako systém Pontos – sledování měřících bodů rozmístěných po měřeném objektu. Výrobce je rovněž společnost GOM. Parametry systému jsou uvedeny v tabulce č.4.

Tab 4) Parametry Aramis

Typ	ARAMIS 4M
Frekvence snímání	60 Hz – 480 Hz
Rozlišení kamer	2358 x 1728 px
Paměť snímků	Používá PC RAM
Rozměry senzoru	235 x 185 mm
Pracovní teplota	5 – 40 °C
Hmotnost	6,5 kg

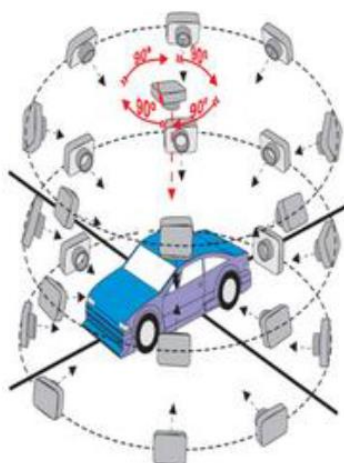
Na obr. 17 je zařízení ARAMIS. Dále budeme značit systém Aramis jako **Pontos 1**.



Obr. 17) Systém ARAMIS

5.3 Tritop

Pro ustavení jednotlivých měření ze systému Pontos na stejný souřadný systém bude použit systém Tritop od společnosti GOM GmbH. Jedná se o fotoaparát s bleskem, který využívá principů fotogrammetrie. Pomocí fotografií z různých poloh a úhlů (obr. 14) určí souřadnice a orientaci měřících bodů, rozmístěných po měřeném objektu, které dále budou použity pro vytvoření souřadného systému. Na obrázku č. 18 je vyobrazen postup snímání objektu.



Obr. 18) Postup snímání objektu

Systém Tritop se dále může použít v těchto oblastech [1]:

- *Kontrola plechových dílů a karosérií např. v předseriové výrobě, při optimalizaci procesu, při zkoušce nástrojů, na počátku sériové výroby nebo v jejím průběhu pomocí náhodných vzorků*
- *Kontrola kvality rozměrných objektů, např. v letectví, loďařství, u větrných turbín,...*
- *Ověření plastových dílů, např. ve fázi kontroly prvních dílů*
- *Ověření a zaznamenání upínek a přípravků*
- *Měření modelů a prototypů, např. interiér vozidel a vnější návrh*
- *Ověření trubic a drátů s ohledem na jejich trojrozměrný tvar*
- *Měření ořezových hran dvourozměrných polotovarů plechu*

- *Analýza deformací auta a testy v klimatické komoře*
- *Měření pole referenčních bodů*



Obr. 19) Sestava Tritop

5.4 DMG Microset VIO 20150 Linear

Jedná se o měřicí stanici na nástroje. V prostorách firmy MCAE Systems je zařízení použito pro předseřizovací operace pro frézku DMG 65 Monoblock. Bude využito pro měření opotřebení nástroje. *Řada přístrojů VIO Linear umožňuje opakovatelnou přesnost měření $\pm 1 \mu\text{m}$ a vyniká vysokou dynamikou měření díky použití lineárních motorů v pohonech os X a Z.* [1]



Obr. 20) DMG Microset VIO 20150 Linear

6 TUHOST

Tuhost je schopnost pevných těles nedeformovat se pod zatížením. [9]

Je to vlastnost mechanických částí nebo konstrukcí, jako jsou lisy, obráběcí stroje, průmyslové roboty atd. Nízká tuhost průmyslového robotu způsobuje jeho nižší opakovatelnou přesnost polohování - výrazně ovlivňuje přesnost polohování. Dále zhoršuje i součinnost jednotlivých mechanismů, zvyšuje tření a opotřebení v pohyblivých spojeních. Dochází ke zvyšování potřebného příkonu k realizaci pohybových funkcí. [10] Tuhost může být charakteristikou ohybu, tlaku nebo tahu, krutu nebo stříhu. [9]

V axiálním směru je tuhost definována vztahem EA , v ohybu EJ_z , v krutu GJ_P a ve stříhu GA .

E, G Youngův Modul

S příčný průřez

J_z, J_P osový moment a polární kvadratický moment

Můžeme tedy vyjádřit následně:

$$\text{Tuhost v posunutí} \quad c_p = F / y \text{ [N/m]} \quad (23)$$

$$\text{Tuhost v natočení} \quad c_n = M / \varphi \text{ [Nm/rad]} \quad (24)$$

$$\text{Tuhost v krutu} \quad c_k = Mk / \varphi \text{ [Nm/rad]} \quad (25)$$

Kde: F - síla [N];

y - posunutí dané deformací vyvolané silou F [m]

M - moment [Nm]

φ - úhel natočení daný příslušnými deformacemi [rad]

Tuhost konstrukce průmyslového robotu je závislá na [10][14]:

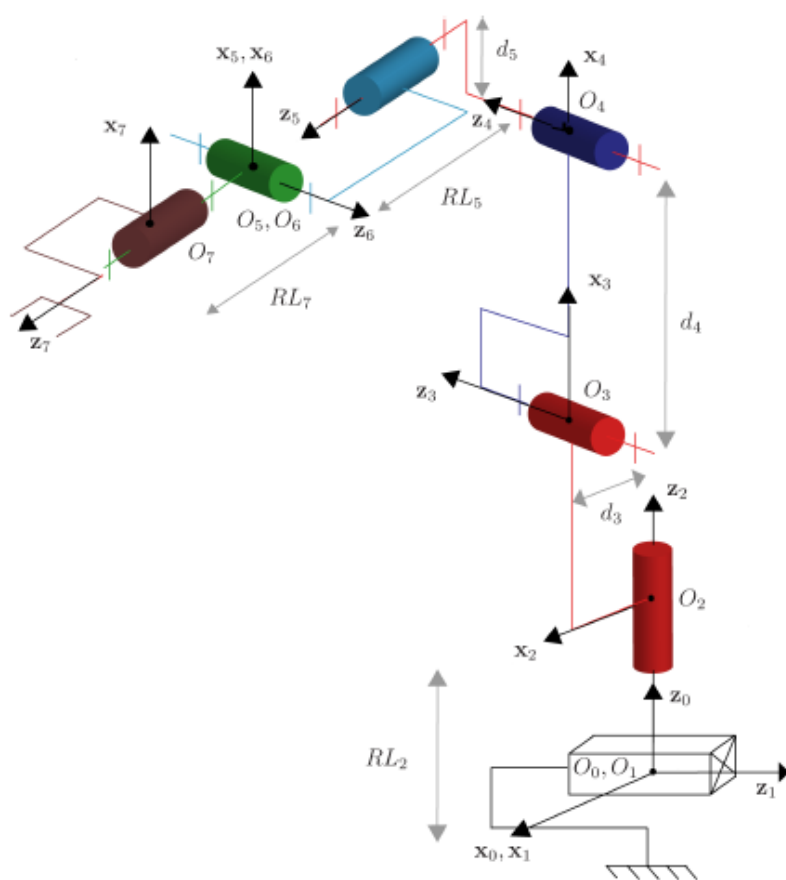
- Druhu použitého materiálu
- Geometrických charakteristikách deformovaného tělesa
- Konfiguraci robotu
- Tuhosti spojů a kloubů
- Mechanické tuhosti pohonů
- Tuhosti ovládací smyčky
- Druhu zatížení a typu podpěr, atd.

Konstrukce průmyslových robotů je vystavena působení těchto sil [10]:

- tíhové síly dané hmotnostmi vlastní konstrukce a hmotností zátěže
- dynamické síly vznikající při rozběhu a brzdění pohybových jednotek
- vnější síly vznikající při realizaci technologických operací a při spolupráci s jiným zařízením

Problematikou tuhosti průmyslových robotů se v dnešní době zabývá mnoho výzkumů. Např. Gautier a kolektiv [11] navrhuje metodu na zjištění tuhosti kloubů robotu založenou na výstupních datech z torzních motorů. Milutinovic a kolektiv [12] analyzují tuhost pětiosého robotu pomocí různých obráběcích operací, při nichž sledují každý pohybový kloub průmyslového robotu. Gong a kolektiv [13] zjišťují vliv teplotních výkyvů na deformaci průmyslového robotu.

Obvyklá kinematická struktura šestiosého průmyslového robotu je na obr. 21.



Obr. 21) Kinematické schéma šestiosého robotu

7 STATISTIKA

Velký počet naměřených dat se jeví lidskému pozorovateli jako nepřehledné a těžko z nich vyvodí výsledky. Úkolem statistiky je zpřehlednit naměřená data formou tabulek, grafů, číselných a jiných charakteristik, uspořádat data do snadněji vnímatelné formy.

7.1 Vymezení pojmů

Statistický soubor je množina všech prvků, které jsou předmětem daného statistického zkoumání. Každý z prvků je statistickou jednotkou. Prvky tvořící statistický soubor mají určité společné vlastnosti - tzv. identifikační znaky - umožňující určit, zda prvek do daného statistického souboru patří nebo nepatří. Identifikační znaky tedy statistický soubor vymezují. [17]

Statistické myšlení znamená [15]:

- Jasně vymezení problému, který má být měřen (řešen)
- Stanovení rozhodující veličiny – jakostní vlastnosti a způsobu jejího zjišťování
- Uvědomění si, že výsledky měření vykazují jistou (často jen částečně odstranitelnou) variabilitu.
- Vytváření podskupin homogenních výsledků, zahrnujících pouze náhodnou proměnlivost.
- Respektovat náhodné odebírání jednotek do náhodných výběrů, tak aby každá jednotka v souboru měla stejnou pravděpodobnost, že může být vybrána do výběru.
- Studium nejen celkové variability, ale i variability uvnitř podskupin a variability mezi podskupinami (v čase).
- Provádění dostatečného počtu pozorování.
- Vážení rizik chybných závěrů, činěných na základě neúplné informace z náhodných výběrů.
- Prezentování dat přehledně, ve zhuštěné formě číselně, nebo graficky.
- Charakterizování dat číselně, udáním polohy na číselné ose a míry proměnlivosti – variability.
- Uvědomění si nejen variability studované náhodné veličiny, ale i z ní odvozené variability vypočítaných statistik – výběrových charakteristik.

7.2 Etapy statistického zkoumání

Jedná se o jednotlivé pracovní fáze shodné s postupem při vědeckých experimentech.

7.2.1 Statistické zjišťování

Znamená získání dat, tedy souboru naměřených hodnot. Je to nejdůležitější část experimentální práce, neboť chybně získané nebo neúplné údaje již dalšími sebepečlivějšími postupy nelze opravit. Zde se plně uplatní pečlivost záznamu všech podmínek, za kterých byla data získána. [16]

7.2.2 Zpracování statistických údajů

Představuje třídění naměřených hodnot, jejich sestavení do tabulek a grafů, výpočet statistických charakteristik, korelační a regresní analýza apod.

Tabulky všech naměřených hodnot, výsledné statistické charakteristiky a grafy představují v odborných a vědeckých publikacích části označované jako výsledky. [16]

7.2.3 Vyhodnocení zpracovaných údajů a jejich analýza

Je konečnou fází statistické práce. V publikacích bývá označena jako diskuse a závěr. Představuje porovnání námi získaných výsledků s teoretickými předpoklady, s výsledky uvedenými v literatuře apod. V případě odchylek pak jejich zdůvodnění, případně návrh postupu dalšího šetření.

V závěru se uvede konečný výsledek - nejčastěji střední hodnota a míra její variability, která bývá vyjádřena intervalem shody pro určitou pravděpodobnost (v biologických vědách a medicíně většinou 95 %, přičemž u souborů s „normálním“ rozložením se nejčastěji používá aritmetický průměr a směrodatná nebo relativní směrodatná odchylka jako míra variability našeho měření, směrodatná odchylka průměru pak při porovnání průměrů základního a výběrových souborů. Pokud nemůžeme zamítnout nulovou hypotézu v testu normality, je správnější jako míru polohy uvádět medián a/nebo modus; jako míru variability, vzhledem k jednoduchosti výpočtu nějaké rozpětí).

Právě vzhledem k pravděpodobnostnímu charakteru zkoumaných jevů není matematicky možno přesně vystihnout všechny kvantitativní i kvalitativní vlastnosti. Tato skutečnost vyžaduje v praxi vždy určitou opatrnost při formulování závěrů a především rozsahu jejich platnosti. [16]

7.3 Chyby měření

Abychom obdrželi co nejvěrohodnější výsledek, vypovídající o řešeném problému, je třeba vždy provádět co největší rozsah (počet) měření. Můžeme-li změřit všechny existující prvky, mluvíme o tzv. základním souboru. Jeho rozsah (počet měření) se označuje N . To je případ velice vzácný. Běžně pracujeme pouze s určitou částí tohoto souboru, neboť základní soubor bývá příliš rozsáhlý a z praktických důvodů (např. časových) neměřitelný. Proto pracujeme pouze s náhodně vybranou částí jeho prvků označovanou jako náhodný výběrový soubor. Jeho rozsah (počet měření) označujeme n . Při opakovaném měření nedostaneme zcela shodné výsledky vzhledem k nepřesnosti přístrojů, nedokonalosti smyslu experimentátora a obtížnosti dodržet přesně stejné podmínky během měření (teplota, barometrický tlak, vlhkost vzduchu v laboratoři apod.). Takto vzniklé chyby dělíme do **tří skupin** [16]:

7.3.1 Chyby hrubé

Jsou nevhodnou volbou metody (resp. postupu) nebo hrubou nedbalostí experimentátora. Výskyt hrubé chyby vždy negativně ovlivní správnost konečného výsledku. Takové výsledky proto ze souboru vylučujeme a nepoužijeme je ke zpracování statistických údajů.

Abychom mohli odlišit výsledky zatížené hrubou chybou od krajních hodnot, které ještě patří do souboru, je vhodné použít statistických postupů, tzv. testů, pomocí nichž je možno tyto odlehlé (odlišné) výsledky testovat. Při malém počtu měření umožňuje takovéto objektivní posouzení např. Q test (Deanův a Dixonův test), který využívá variační rozpětí R .

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (26)$$

U Q testu seřadíme naměřené hodnoty podle velikosti od nejmenší po největší. Testovací kritérium Q pak vypočteme:

$$Q = \frac{(x_e - x_s)}{R} \quad (27)$$

kde x_e je zkoumaná extrémní odlehlá hodnota (nejvyšší nebo nejnižší z celého souboru)

x_s je hodnota s x_e sousedící při uspořádání podle velikosti

R je variační rozpětí

Vypočtenou hodnotu Q porovnáme s níže uvedenou tabelovanou tzv. kritickou hodnotou QT podle požadované pravděpodobnosti a rozsahu souboru (počtu měření) n. Je-li vypočtená hodnota Q větší než tabelovaná QT, je třeba testovanou extrémní hodnotu vyloučit pro další výpočty. Tím se nám logicky v další práci sníží rozsah souboru n o 1. Pokud je Q menší než QT, zůstává testovaná extrémní hodnota v souboru a předpokládáme, že se jedná pouze o náhodný vliv. Vyloučení extrémních hodnot uvedeme v protokolu o měření. [16]

V této práci byly extrémní hodnoty testovány Deanovým – Dixonovým testem a odlehlé hodnoty s pravděpodobností $P = 95\%$ byly vyloučeny.

Tab 5) Tabulka hodnot QT

n	Qt	
	P = 95%	P = 99%
3	0,914	0,988
4	0,765	0,889
5	0,642	0,760
6	0,560	0,698
7	0,507	0,637
8	0,468	0,590
9	0,437	0,555
10	0,412	0,527

7.3.2 Chyby soustavné (systematické)

Mají stále stejný charakter a zkreslují výsledky vždy v určitém směru. Tím způsobují soustavně vyšší nebo nižší výsledky. Jejich příčinou je nejčastěji chybný metodický přístup, špatné nastavení nebo porucha přístroje a stále stejná chyba experimentátora. Pravidelnost těchto chyb umožňuje určit jejich velikost experimentálně nebo výpočtem. Pak můžeme

upravit pracovní postup nebo vyměnit přístroje. Ve výjimečných případech též opravit výsledky pomocí přepočítacího faktoru stanoveného dodatečně (např. opakovaným měřením části vzorků). [16]

7.3.3 Chyby náhodné

Způsobují nahodilé vlivy uplatňující se nepravidelně bez jakýchkoliv zákonitostí podle okamžitých podmínek měření. Na rozdíl od soustavných chyb je nelze ani hodnotit ani systematicky odstranit. Jejich velikost lze pouze s určitou pravděpodobností odhadnout metodami matematické statistiky. [16]

7.4 Třídění statistických dat

Třídění navazuje na etapu zjišťování dat. Účelem je rozčlenit a uspořádat data podle jednoho nebo více znaků (hledisek, vlastností, kritérií apod.). Při variačním třídění, což je třídění do skupin (intervalů, tříd) podle variant (obměn) třídícího znaku, který má kvantitativní charakter je třeba dodržet následující [16]:

- skupiny musí být vytvořeny tak, aby bylo možné do nich začlenit všechny hodnoty souboru, a pro každou hodnotu musí platit zcela jednoznačně, do které skupiny bude zařazena,
- má-li třídící znak nespojitý (diskrétní) charakter s malým počtem obměn, pak třídíme do skupin podle všech těchto obměn,
- je-li třídící znak spojitý nebo nespojitý s velkým počtem obměn, nemůžeme vzhledem k přehlednosti třídít podle všech těchto obměn. V těchto případech je třeba sloučit blízké obměny třídícího znaku do společných intervalů, čímž získáme skupinové (intervalové) rozdělení četností
- počet intervalů nejčastěji označovaný k , by se měl pohybovat mezi 6 až 20,
- pokud je to možné, tvoříme intervaly o stejné šířce (rozdíl mezi krajními hodnotami intervalu je vždy stejný), která má být volena tak, aby se zachovaly informace o původních datech. Proto by neměly být příliš široké,
- všechny intervaly by měly mít dostatečný počet jednotek, což však není vždy podmínkou, mohou být i prázdné intervaly,
- je vhodné volit středy intervalů jako celá (zaokrouhlená) čísla.

7.5 Statistické charakteristiky

Aritmetický průměr [18]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (28)$$

Rozptyl [18]

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \bar{x}^2 \quad (29)$$

Směrodatná odchylka [18]

$$s = \sqrt{s^2} \quad (30)$$

Hranice úchylek

Volím pravidlo dvou sigma, které říká, že při opakování náhodného pokusu řídicího se normálním rozdělením budou hodnoty vycházet v tomto pásmu s pravděpodobností 95,45 %.

$$\bar{x} \pm 2s \quad (31)$$

8 PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTŮ

8.1 Vymezení experimentu

Experiment je dnes hojně využívaným pojmem jak v oblasti vědy a techniky, tak i v běžném životě. Jeho úkolem je ověřit nebo vyvrátit chování jevu, nebo samotný jev popsat. Experiment je hlavní nástroj pro empirické rozšiřování vědeckého poznání. Vědecký experiment se vyznačuje plánovitostí, opakovatelností a tím i ověřitelností.

Experimenty můžeme dělit podle různých hledisek:

1) Podle typu objektu, na kterém se experiment realizuje [17]:

- Reálný experiment – je to soustava cílevědomých a cílevědomě řízených činností a prostředků k jejich realizaci, které provádí subjekt na aktivovaném reálném objektu, s cílem získat objektivizované informace o jeho projevech, a to na základě přímého nebo zprostředkovaného měření, resp. přímého nebo zprostředkovaného pozorování na něm, jako podklad pro řešení určitého problému na tomto nebo na jiném objektu. Aktivace objektu patří k základním atributům reálného experimentu. Aktivace je tím, čím se experiment odlišuje od jiných empirických činností, např. od pozorování.
- Myšlenkový experiment – je to soustava podvědomých a vědomých mozkových činností realizovaných v mozku, tvořená představami, zkušenostmi, úvahami a vědomostmi, a to o možnostech řešení problémových situací v reálném experimentu, ve vztahu k jeho využití při řešení určitého problému.
- Počítačový experiment – je to soustava cílevědomých činností prováděných subjektem na počítači tak, že se opakovaně realizuje výpočtový algoritmus určité matematické teorie pro definovanou množinu vstupních parametrů: Cílem je přispět k řešení určitého problému specifickými přístupy výpočtového modelování (simulační modelování a citlivostní analýza).

2) Hledisko oboru, v němž se experiment realizuje [17]:

- Obecně XXX experiment – kde za XXX lze dosadit jakýkoliv obor.
- Technický experiment – je to experiment realizovaný v oblasti techniky na technickém objektu.

3) Hledisko místa realizace experimentu [17]:

- Laboratorní experiment – je to experiment, pro který je charakteristické, že se realizuje za předem stanovených standardních podmínek okolí experimentu, v tzv. laboratorních podmínkách.
- Provozní experiment – je to experiment realizovaný v provozních podmínkách objektu.
- Přírodní experiment – je to experiment realizovaný v přírodních podmínkách.

4) Hledisko způsobu řízení experimentu [17]:

- Aktivní experiment – objekt, na němž se realizuje experiment, může subjekt aktivovat a tuto aktivaci případně i řídit. Měřené projevy objektu jsou tedy důsledkem aktivace objektu subjektem.
- Simulační experiment – pro tento experiment je charakteristické, že aktivace objektu se realizuje podle předem stanovené strategie zadávání vstupních údajů tak, aby byly experimentálně simulovány požadované procesy na objektu.
- Plánovaný experiment – je to experiment, který se realizuje v podmínkách plánovaného měření.
- Experiment dávkový, zpětnovazebně řízený a interaktivní

5) Hledisko cíle využití experimentu [17]:

- Vědecký experiment – je to experiment realizovaný v poznávacích procesech v základním výzkumu. Výsledky se využívají k rozvoji ve vědeckých, technických nebo jiných oborech.
- Praktický experiment – je to experiment, s jehož využitím se řeší praktické problémy, což jsou subjektem formulované konkrétní problémové situace, vymezené jako nestandardní stavy subjektů, společnosti, přírody, obecně reálných i abstraktních objektů.

V našem případě, kdy budeme měřit kinematické veličiny průmyslového robotu při operaci vrtání, se bude jednat o experiment:

- Technický
- Reálný
- Simulační
- Realizovaný v provozních podmínkách
- Vědecký

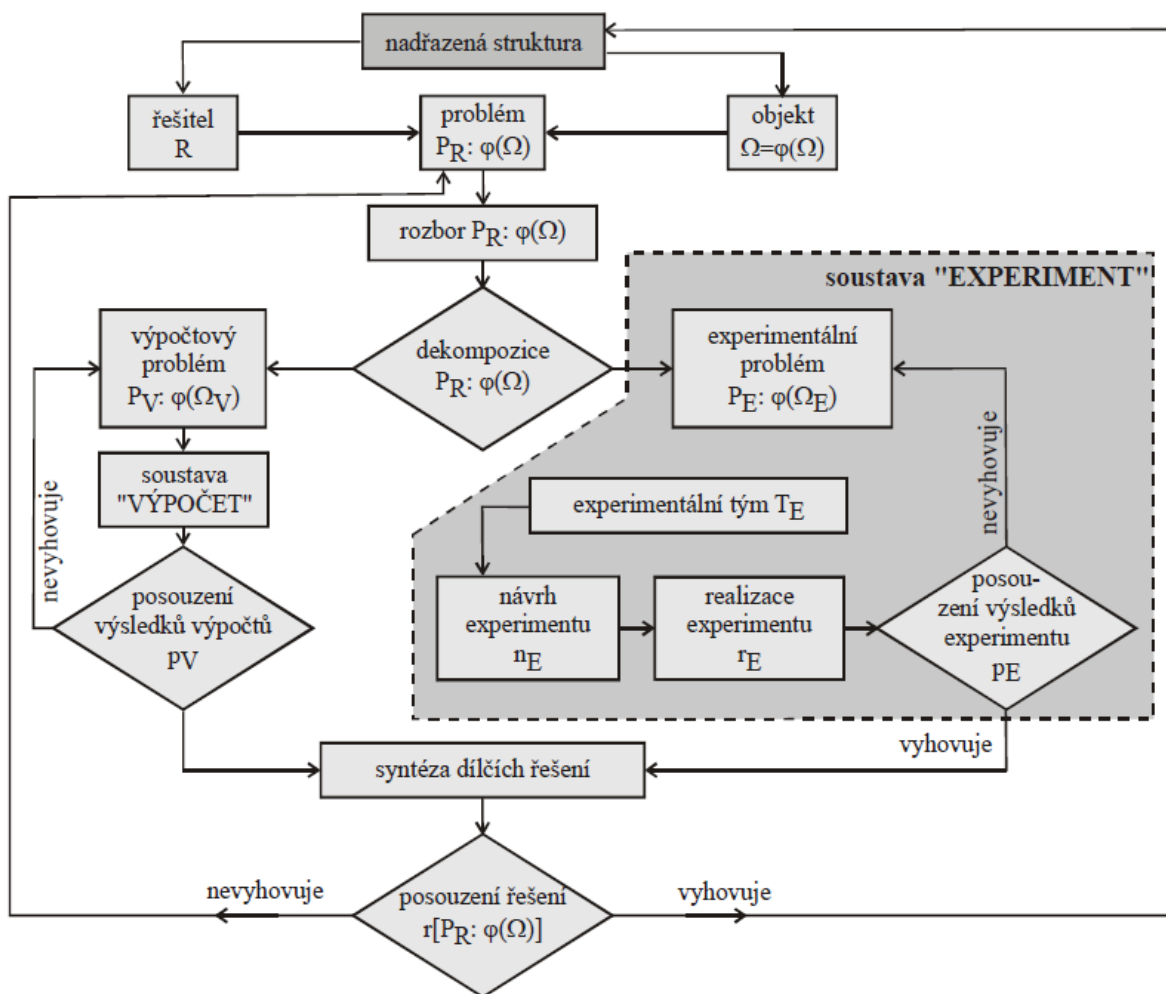
8.2 Struktura experimentu

Z určité nadřazené úrovně je vytvořen řešitelský tým R , který má na určitém objektu Ω (tento objekt je obvykle považován za soustavu, což je na Obr. x zdůrazněno symbolem $\phi(\Omega)$) a na určité úrovni řešit určitý problém $P_R(\Omega)$. [17]

Nadřazenou úroveň (strukturu) tvoří Škoda Auto, MCAE Systems a Vysoké učení technické v Brně. Řešitel problému T_E je autor textu (Jan Vogel). Problém $P_R(\Omega)$ představuje vyjádření tuhosti na objektu (Ω), kterým je průmyslový robot ABB při operaci vrtání. Vyřešení problému $P_R(\Omega)$ vyžaduje experimentální řešení $P_E(\Omega)$.

Řešitel problému T_E provede návrh experimentu n_E , realizaci a posouzení p_E získaného řešení $r[PE(\Omega)]$. Na nejnižší rozlišovací úrovni lze pak experiment považovat za soustavu prvků, které tvoří základní strukturu experimentu:

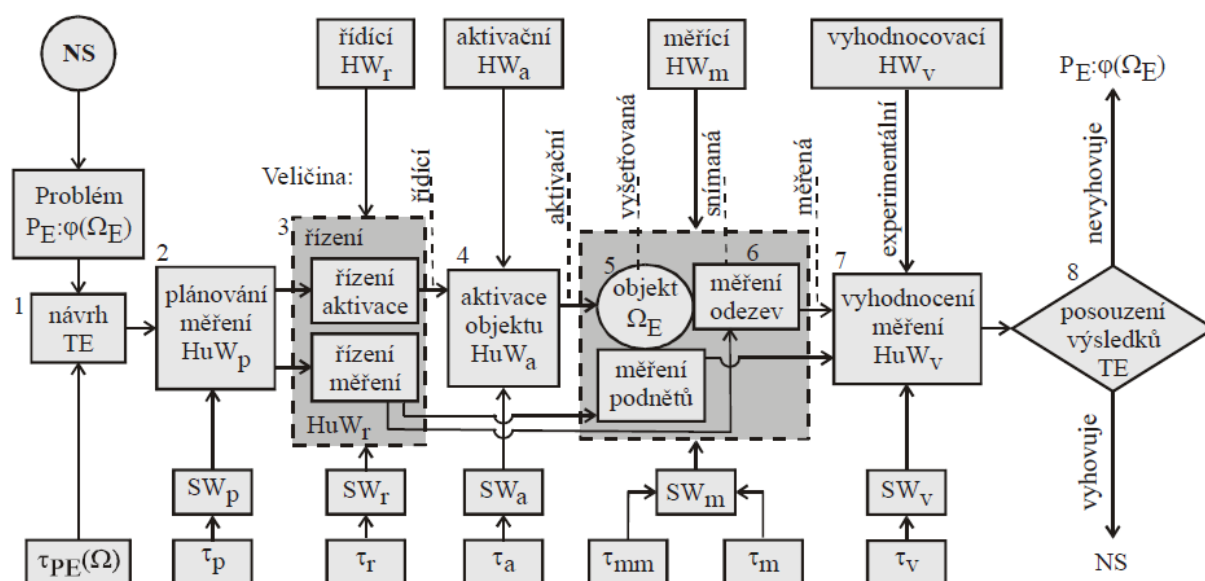
$$E = \phi \{T_E, n_E, r_E, p_E\}$$



Obr. 22) Základní struktura experimentu začleněná do komplexní struktury řešení problému [17]

V našem případě se nebudeme zabývat výpočtovým problémem, levá větev diagramu v obr. 22 tedy odpadá.

Pokud se jedná o řízený experiment s plánovaným měřením, přibývají do základní struktury další prvky – řízení aktivace, řízení měření projevů a plánování měření [17]. Jedná se o procesní část struktury experimentu – návrh měření až po vyhodnocení měření na obr. 23.



Obr. 23) Obr. Komplexní zobecněná struktura experimentu [17]

HW_E - Experimentální řetězec - Technické prostředky nutné k realizaci činností v rámci experimentu [17].

- HW_r – řídicí řetězec
- HW_a – aktivační řetězec
- HW_m – měřicí řetězec
- HW_v – vyhodnocovací řetězec

τ_E - teorie experimentu – průnik teorií, pomocí nichž jsou realizovány jednotlivé prvky procesního řetězce[17] .

- Teorie plánování měření τ_p – je to teorie o tom, jak kombinovat jednotlivé aktivační veličiny a jaké mají mít hodnoty, aby byla zaručena optimální relace mezi rozsahem měření a statisticky nejpriznivější úrovní měření získaných informací.
- Teorie řízení τ_r – tato teorie je tvořena teorií řízení aktivace experimentálního objektu Ω_E a teorií řízení měření aktivačních veličin a veličin charakterizujících projevy objektu.
- Teorie aktivace τ_a experimentálního objektu Ω_E – aktivací je chápán takový proces působení okolí experimentálního objektu Ω_E na tento objekt, který vyvolá jeho měřitelné projevy. Aktivací může být zatěžování, buzení, uvedení do provozu, v medicíně aplikace léků, elektrické podráždění, ve společenské oblasti např. vypsání voleb nebo referenda apod.

- Teorie měřících metod τ_{mm} – je to teorie fyzikálního jevu využívaného při měření příslušné fyzikální veličiny, např. termoelektrický jev se využívá při měření teplot.
- Teorie měřících soustav τ_{ms} – je to teorie uspořádání měřícího řetězce z hlediska realizace příslušné měřící metody, dále teorie přenosu signálů měřícím řetězcem. Patří sem i problematika určování statických, dynamických, informačních a spolehlivostních vlastností měřících přístrojů.
- Teorie vyhodnocení (zpracování) výsledků měření τ_v – je to teorie o statistickém zpracování výsledků měření odpovídající statistickou metodou.

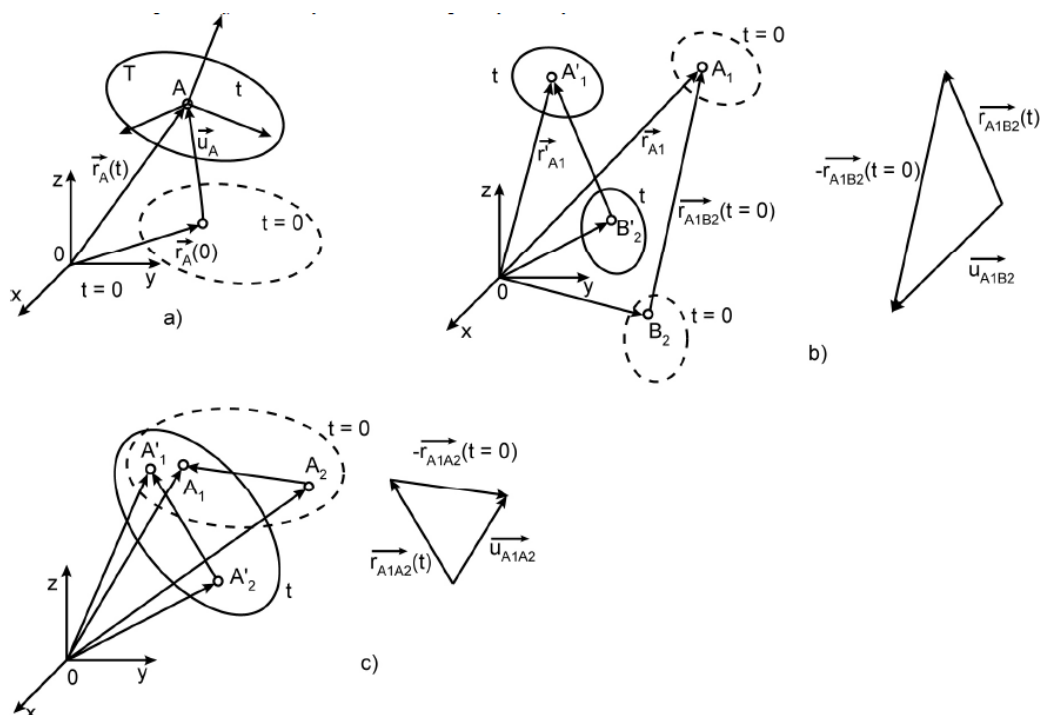
SW_E – Programové vybavení – příslušné dílčí teorie je vhodné algoritmovat, čímž se vytvoří odpovídající dílčí programová vybavení. [17]

Sjednocením procesní, technické, teoretické a programové části experimentu se získá komplexní zobecněná struktura experimentu. (obr. 23)

8.3 Kinematické veličiny

Pod pojmem *mechanický pohyb* označujeme časové změny vzdáleností a úhlů vymezených vzhledem [17]:

- k materiálním objektům v realitě,
- k teoretickým objektům při teoretických přístupech.



Obr. 24) Kinematické veličiny

Prostředkem tohoto vymezení je základní prvek tělesa, kterým je trojnásobně elementární prvek [17]. Jedná se o část tělesa, která je definována geometricky polohovým bivektorem:

$$\vec{r}_A = (x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)_A \quad (32)$$

Polohový bivektor \vec{r}_A se vztahuje ke globálnímu souřadnicovému systému XYZ, kterým je definován základní prostor (obr. 24a).

Pokud dochází ke změně bivektoru v čase nastává absolutní pohyb tělesa ke globálnímu souřadnicovému systému XYZ.

Za absolutní kinematické veličiny pak označujeme:

$$\text{absolutní posuv: } \vec{u}_A = \vec{r}_A(t) - \vec{r}_A(0) \quad (33)$$

$$\text{absolutní rychlost: } \vec{v}_A = \dot{\vec{u}}_A \quad (34)$$

$$\text{absolutní zrychlení: } \vec{a}_A = \ddot{\vec{u}}_A \quad (35)$$

K relativnímu pohybu dochází v případě, že máme dvě tělesa určená dvěma bivektory 1, 2 (Obr.24b) a patří k nim:

$$\text{relativní posuv: } \vec{u}_{A_1B_2} = \vec{r}_{A_1B_2}(t) - \vec{r}_{A_1B_2}(t=0) \quad (36)$$

$$\text{relativní rychlost: } \vec{v}_{A_1B_2} = \dot{\vec{u}}_{A_1B_2} \quad (37)$$

$$\text{relativní zrychlení: } \vec{a}_{A_1B_2} = \ddot{\vec{u}}_{A_1B_2} \quad (38)$$

Deformační kinematické veličiny vyjadřují změnu např. dvou bivektorů v čase na jediném tělese (Obr.24c)

Patří k nim:

$$\text{deformační posuv: } \vec{u}_{A_1A_2} = \vec{r}_{A_1A_2}(t) - \vec{r}_{A_1A_2}(t=0) \quad (39)$$

$$\text{deformační rychlost: } \vec{v}_{A_1A_2} = \dot{\vec{u}}_{A_1A_2} \quad (40)$$

$$\text{deformační zrychlení: } \vec{a}_{A_1A_2} = \ddot{\vec{u}}_{A_1A_2} \quad (41)$$

Poměrné deformační posuvy vyjadřují deformační posuv $\vec{u}_{A_1A_2}$ vztahovaný na vzdálenost $\overline{A_1A_2}$ bodů A1, A2. V tomto smyslu je poměrný deformační posuv délkovým přetvořením ϵ .

Jedním ze základních úkolů experimentální mechaniky je určení kinematických veličin elementárních prvků materiálních těles na základě měření. V zásadě se setkáváme s těmito typy úloh [17]:

A. je zadán elementární prvek na tělese a mají se určit:

- kinematické veličiny prvku v daném časovém okamžiku,
- časový průběh kinematických veličin prvku a jejich charakteristiky,
- kvalitativní změny časového průběhu kinematických veličin prvku,

B. je zadáno celé těleso a mají se určit:

- kinematické veličiny celého tělesa v daném časovém okamžiku
- časový průběh kinematických veličin celého tělesa a jejich charakteristiky
- kvalitativní změny časového průběhu kinematických veličin celého tělesa

Při technických experimentech se spíše setkáváme s úlohami typu B, kde se měří celé těleso.

Základem správného průběhu experimentu jsou teoretické znalosti, souvislost mezi řešeným problémem a vlastním měřením typu úlohy A a zpracování výsledků měření tak, aby bylo podkladem pro řešení experimentálního i nadřazeného problému. Řešení úloh typu B vyžaduje [17]:

- 1) Určit na tělese elementární prvky, v nichž se budou měřit kinematické veličiny, a to z hlediska charakteru problému a z hlediska možné realizace měření (jsou to tzv. nezávislé prvky - ostatní prvky tělesa, v nichž se neměří, jsou závislé prvky).*
- 2) Vyjádřit závislosti mezi kinematickými veličinami závislých a nezávislých prvků (závislosti umožňují určit kinematické veličiny závislých prvků na kinematických veličinách nezávislých prvků, určených měřením).*
- 3) Řešit úlohu A (realizovat vlastní měření) s ohledem na formulovaný experimentální problém.*
- 4) Výsledky měření zpracovat z hlediska jejich objektivizace a z hlediska řešení primárního experimentálního problému.*

9 NÁVRH MĚŘÍCÍCH MÍST A METODY MĚŘENÍ

9.1 Metoda měření

1) Zadání úkolu a účel metody

Cílem měření je nalézt optimální velikost posuvové síly pro vrtání tak, aby byla deformace ramene průmyslového robotu minimální a současně, aby vznikající chvění od řezného procesu bylo také minimální.

Bude zadáno rozmezí (interval hodnot) posuvových rychlostí při vrtání, při kterých budeme snímat odchylky měřících bodů na rameni robotu od předem zaznamenané trajektorie bodů při „vrtání“ bez zatížení. Výsledky budou sloužit k vyjádření průběhu tuhosti ramene při změnách posuvové rychlosti v jednotlivých oblastech pro vrtání a k nalezení optimální velikosti posuvové složky řezné síly.

2) Statistický soubor

V našem případě se jedná o množinu jednotlivých vrtání v různých oblastech pracovního prostoru průmyslového robotu s různými posuvovými rychlostmi pro vrtání, při kterých budou snímány měřící body a zátěžné momenty na pohybových osách robotu. Jednotkou je tedy jedno vrtání na určitém místě se zadanou posuvovou rychlostí.

3) Vlastnosti obráběného materiálu EN JS-2070 a upnutí

Podskupina - ČSN EN 1563(1997)

Založení - sferoidální grafit - odlitky

Litina s kuličkovým grafitem o vlastnostech [19]:

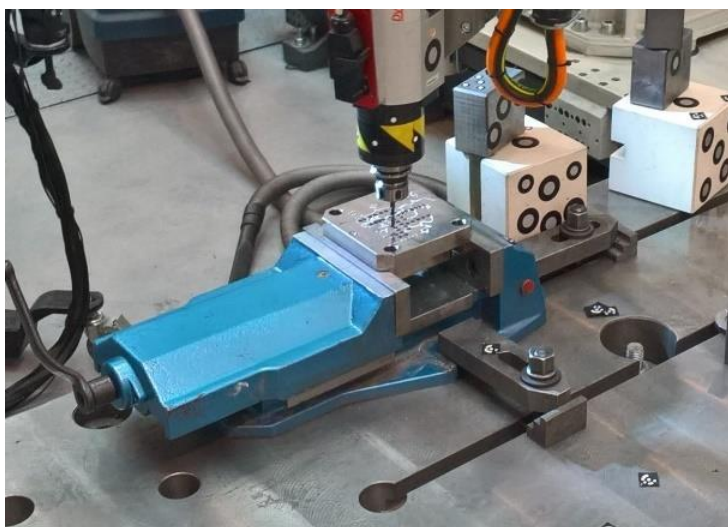
$$R_m = >700 \text{ MPa}$$

$$R_{p0,2} = 420 \text{ Mpa}$$

$$HB = 225-305$$

Tento materiál se používá pro výrobu velkých raznic pro automobilový průmysl. [19]

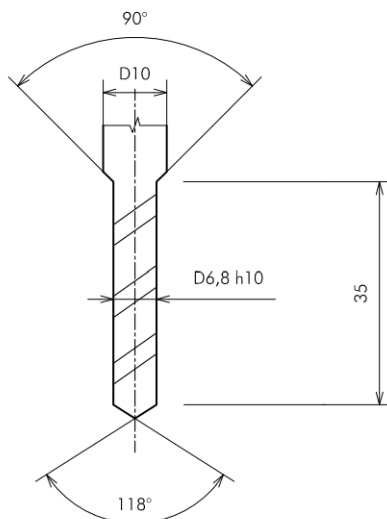
Litinový dílec byl upnut na stůl do svěráku (obr. 25)



Obr. 25) Upnutí obráběného materiálu

4) Nástroj

Sdružený vrták z rychlořezné oceli o prvním průměru 6,8 mm a druhém průměru 10 mm. Byly vrtány díry pouze 30 mm do hloubky – k vrtání druhým průměrem nedošlo. Hlavní rozměry vrtáku jsou na obr. 20.



Obr. 26) Rozměry vrtáku

5) Řezné podmínky

Otáčky vřetene budou konstantní – 1200 ot/min (hodnota byla doporučena pracovníky robotického oddělení Škody Auto). Posuvová rychlost v průběhu jednoho vrtání bude také konstantní. Při dalším vrtání se posuvová rychlost zvýší o daný stupeň. Vrtání proběhne bez přívodu chladicí kapaliny.

Zadaný interval posuvových rychlostí je 40–100 mm/min. Interval rozdělíme na 6 složek:

- 40 mm/min
- 50 mm/min
- 60 mm/min
- 70 mm/min
- 80 mm/min
- 100 mm/min

Řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab 6) Řezné podmínky

Vrtání č.	D [mm]	n [ot/min]	V_c [mm/min]	V_f [mm/min]	V_e [mm/min]	F [N]	A_d [mm ²]	k_c [MPa]	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]	F_{celk} [N]
1	6,8	1200	25,64	40	47,51	0,03	0,06	4033,61	228,57	288	0	367,68
2	6,8	1200	25,64	50	56,189	0,04	0,07	3787,45	268,28	338,03	0	431,55
3	6,8	1200	25,64	60	65,247	0,05	0,09	3598,97	305,91	385,45	0	492,09
4	6,8	1200	25,64	70	74,546	0,06	0,1	3446,9	341,82	430,69	0	549,85
5	6,8	1200	25,64	80	84,007	0,07	0,11	3320,38	376,31	474,15	0	605,33
6	6,8	1200	25,64	100	103,23	0,08	0,14	3119,27	441,9	556,79	0	710,84

Řezná síla byla vypočtena pomocí softwaru **Walter Machining Calculator** od výrobce vrtáku.

Zadané hodnoty:

- Symetrické vrtání šroubovitým vrtákem
- Litina s kuličkovým grafitem se střední hodnotou tvrdosti HB 265 a střední hodnotou meze pevnosti $R_m = 885 \text{ N/mm}^2$
- Otáčky, průměr vrtáku, lineární posuv, hloubka díry

Na obr. 27 je ukázka ze softwaru pro výpočet posuvné síly a dalších hodnot.

Vrtání Symetrické		Průměr		Řezná rychlost		otáčky, RPM	
Litina s kuličkovým grafitem perlitická (HB 265, $R_m 885 \text{ N/mm}^2$)		6.80		26		1200	
posuv na otáčku		Dc mm		Vc m/min		n RPM	
0.08		30		90		0	
fn mm/rev		Hloubka díry		Účinnost		Stupeň opotřebení	
vf mm/min		lm mm		η %		%	
Výpočtové vzorce				Posuvná síla		556.79 Ff N	
				objem materiálu za jednotku času		3.63 cm³/min	
				Doba obrábění		18.00 sec.	
				Krouticí moment		1.50 Mc Nm	
				Potřebný výkon		0.19 Pmot KW	

Obr. 27) Software Walter machining calculator

Použité vzorce pro výpočet jsou v příloze 1.

6) Vybrané jednotky

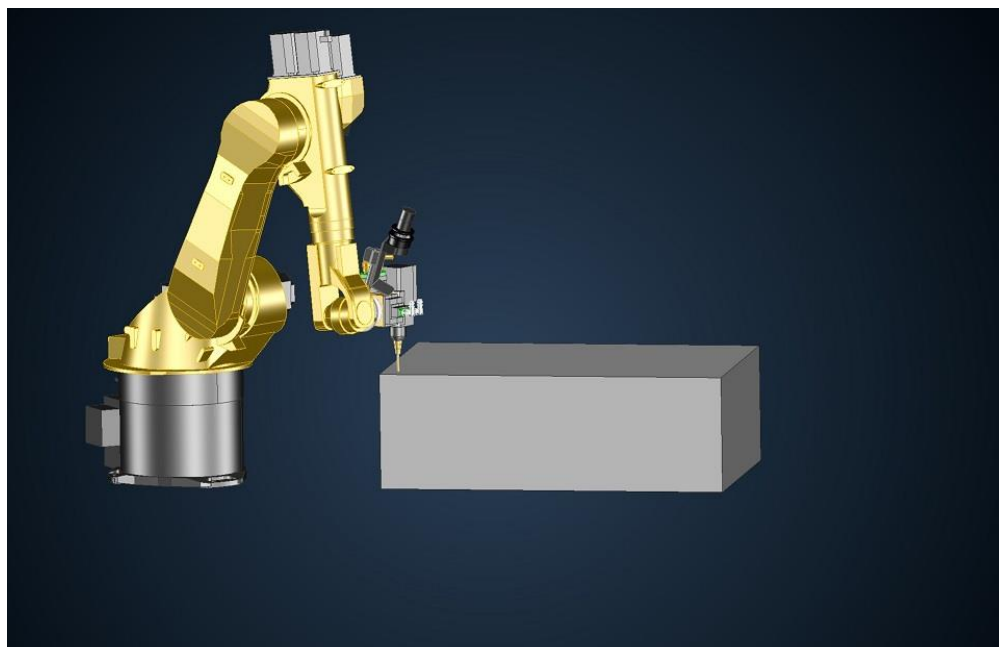
Informace o statistickém souboru nezískáváme ze všech jednotek, ale pouze z určitého výběru. Za jednotku považujeme určitou posuvovou sílu pro vrtání a určitou polohu vrtaného otvoru.

Výběr jednotek proběhne na základě míst pro vrtání. Vrtání ve vertikální ose i vrtání v horizontální ose. Pro vertikální vrtání budou 3 různé pozice elektrovřetene. Pro horizontální vrtání pouze jedna pozice.

Vybrané jednotky:

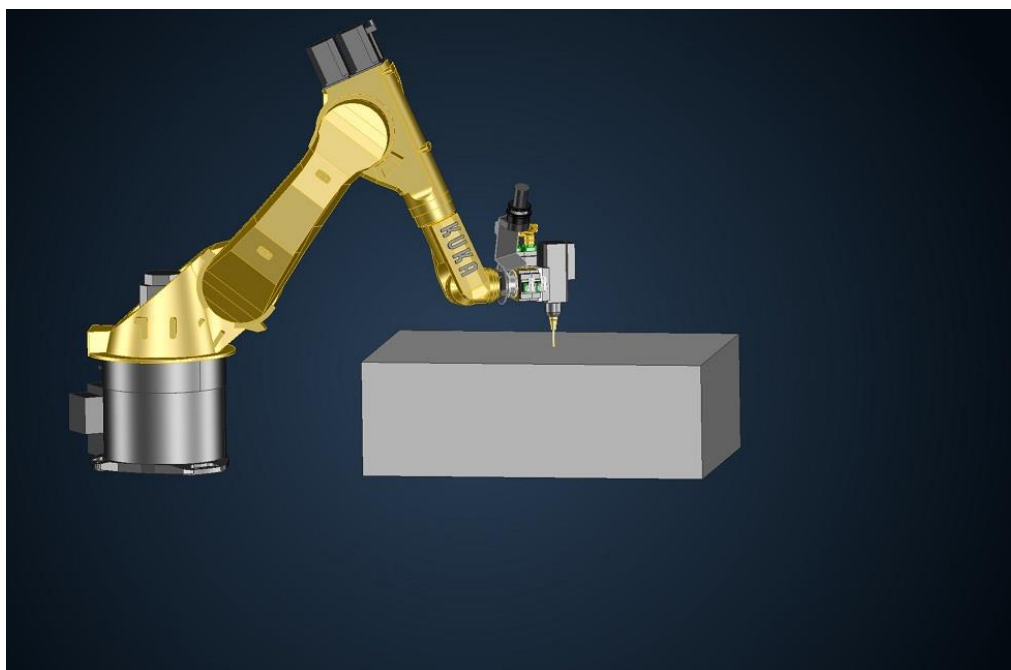
1) Vertikální vrtání

a. Oblast v blízkosti základny robotu – Poloha B



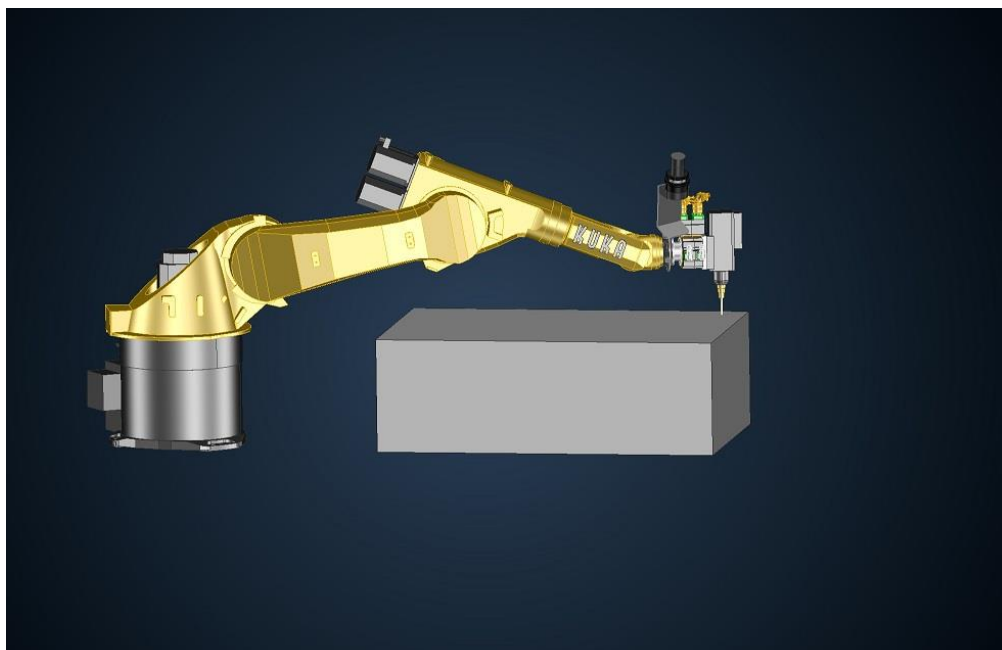
Obr. 28) Oblast vrtání B

b. Oblast v polovině dosahu ramene robotu – Oblast A



Obr. 29) Oblast vrtání A

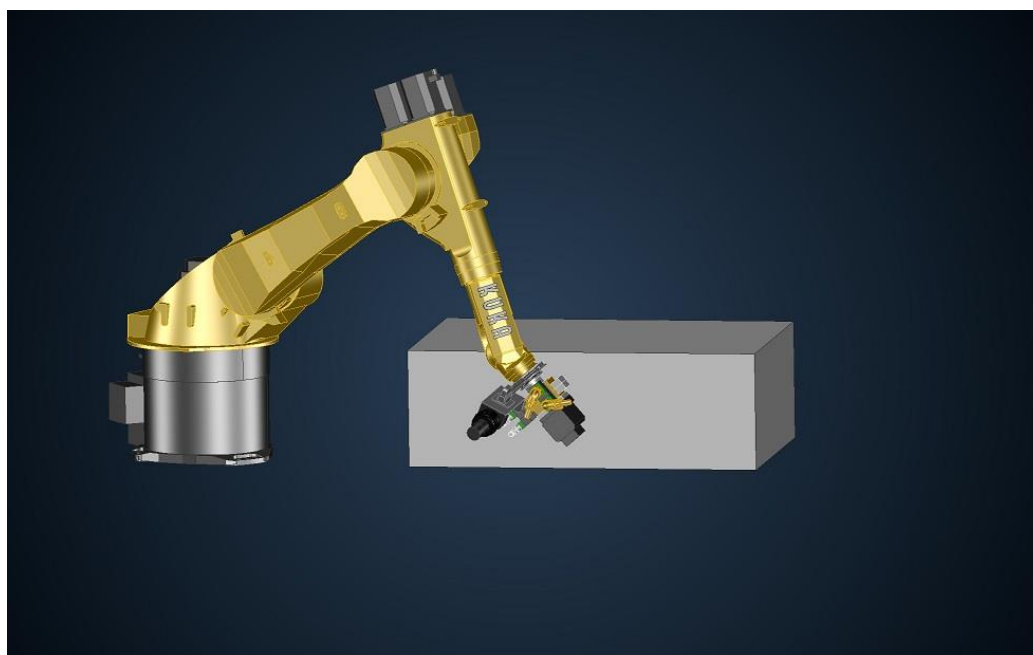
c. Oblast na okraji dosahu ramene robotu – Oblast C



Obr. 30) Oblast vrtání C

2) Horizontální vrtání

a. Oblast v polovině dosahu robotu



Obr. 31) Oblast vrtání

Budou zadány hodnoty posuvových rychlostí pro vrtání a každé měření proběhne 8x pro každou zadanou posuvovou rychlost vrtání. Nejprve budou naměřeny hodnoty odchylek pro všechny zadané posuvové rychlosti v oblasti A vertikálního vrtání. Poté proběhne ověření vyhodnocené nejvhodnější posuvové rychlosti ve zbylých oblastech vertikálního i horizontálního vrtání.

7) Určení statistického znaku

Statistickým znakem tohoto měření je odchylka polohy jednotlivých měřících bodů rozmístěných na robotu při vrtání od jejich polohy při referenčním měření. Jedná se o jednotku kvantitativní. Měřením získáváme vstupní data, ze kterých vzniká vstupní soubor. V naší úloze se jedná o vícerozměrný datový soubor, protože sledujeme více znaků.

$$d_x = x_r - x_n \quad [\text{mm}] \quad (42)$$

$$d_y = y_r - y_n \quad [\text{mm}] \quad (43)$$

$$d_z = z_r - z_n \quad [\text{mm}] \quad (44)$$

$$d_n = n_r - n_n \quad [\text{mm}] \quad (45)$$

Dalším statistickým znakem je moment síly na jednotlivých pohybových osách robotu, který bude snímán přímo softwarem robotu.

$$M_1 \quad [\text{Nm}]$$

$$M_2 \quad [\text{Nm}]$$

$$M_3 \quad [\text{Nm}]$$

$$M_4 \quad [\text{Nm}]$$

$$M_5 \quad [\text{Nm}]$$

$$M_6 \quad [\text{Nm}]$$

Zadaným statistickým znakem při každém měření bude velikost posuvové rychlosti a poloha vrtaného otvoru.

$$v_{f1} \quad [\text{N}]$$

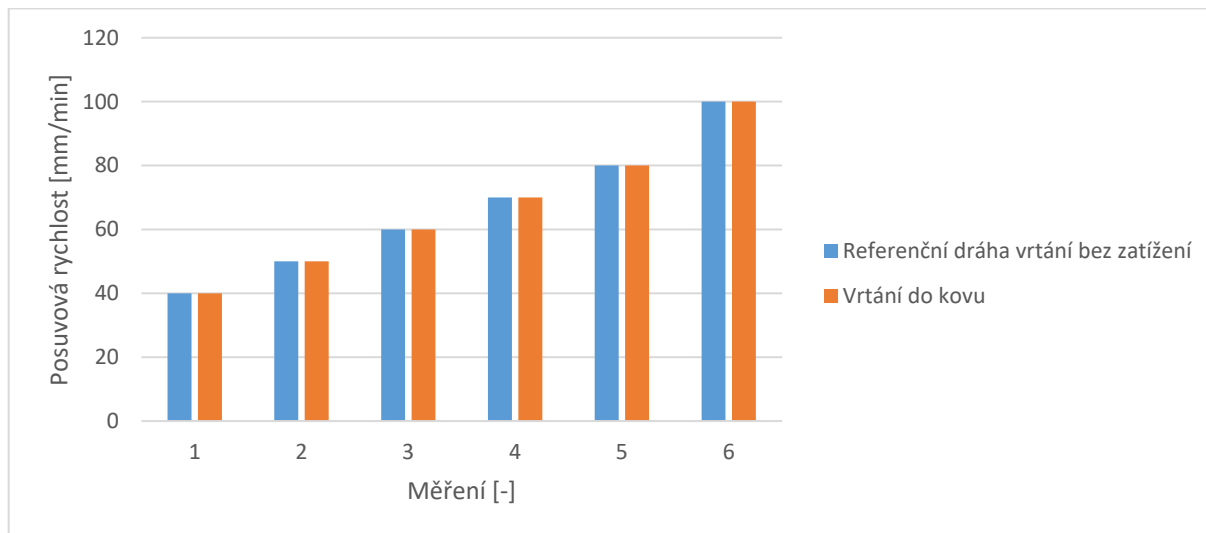
.

.

.

$$v_{f6} \quad [\text{N}]$$

V grafu č. 32 jsou graficky znázorněna jednotlivá měření.



Obr. 32) Jednotlivá měření

8) Určení měřeného prostoru

Tvar měřeného prostoru je krychle. Její velikost je volena tak, aby v měřeném prostoru byl celý měřený průmyslový robot. Čím větší je měřený prostor, tím větší nepřesnosti měření vznikají. Z tohoto důvodu bude využito i druhého systému pro snímání pouze oblasti vřetene. Podle velikosti měřeného prostoru se poté kalibruje měřicí systém Pontos.

9) Zkušební podmínky

Pracovní podmínky se musí dodržovat dle předpisu výrobce průmyslového robotu a zahrnují teplotu, vlhkost, elektromagnetické pole, nečistoty, nadmořskou výšku. Nemělo by také docházet ke kolísání elektrické energie, pneumatického a hydraulického tlaku.

Okolní teplota pro měření by se měla pohybovat kolem 20°C. Z hlediska měření systémem Pontos nesmí teplota přesáhnout toleranci $\pm 2^\circ\text{C}$ v průběhu měření, teplota se bude průběžně kontrolovat. Mezi další nežádoucí vlivy pro měření systémem Pontos patří:

- Pronikání vibrací z okolního prostředí
- Výraznější změna okolního osvětlení
- Prašné prostředí

Při jednotlivých měřeních se budeme snažit o co nejnížší časový interval mezi měřeními a o zachování stálých měřících podmínek.

10) Poloha snímaných bodů

Měřicí body budou rozmístěny na stranu robotu viditelnou od měřicího systému Pontos. Vhodná velikost měřicích bodů bude vybrána podle měřicího objemu.



Obr. 33) Rozmístění měřicích bodů na robotu ABB

11) Způsob měření

Pro dynamickou analýzu průmyslového robotu byly vybrány dva systémy Pontos (5.1, 5.2), pro měření opotřebení nástroje systém DMG Microset (5.4).

Dříve, než proběhne měření na robotu ABB ve ŠKODĚ AUTO v Mladé Boleslavi, bude celý následující postup vyzkoušen na průmyslovém robotu Kuka KR60 v prostorách firmy MCAE Systems.

Postup měření:

- 1) Tvorba programu pro vrtání průmyslovým robotem
- 2) Rozmístění měřicích bodů na povrch průmyslového robotu
- 3) Kalibrace systémů Pontos
- 4) Umístění systémů Pontos do požadovaného prostoru
- 5) Nastavení posuvové rychlosti na danou úroveň

- 6) Získání referenční dráhy měřících bodů při „vrtání“ na prázdno (bez zatížení) pomocí systémů Pontos
- 7) Vrtání snímáním trajektorie měřících bodů umístěných na robotu
- 8) Vyhodnocení odchylek měřených bodů
- 9) Krok 5 až 8 opakovat podle počtu zadaných úrovní rychlostí posuvu vrtání a poloh robotu

Bude použit nový naostřený vrták pro každou posuvovou rychlost.

12) Způsob vyhodnocení

Celková tuhost

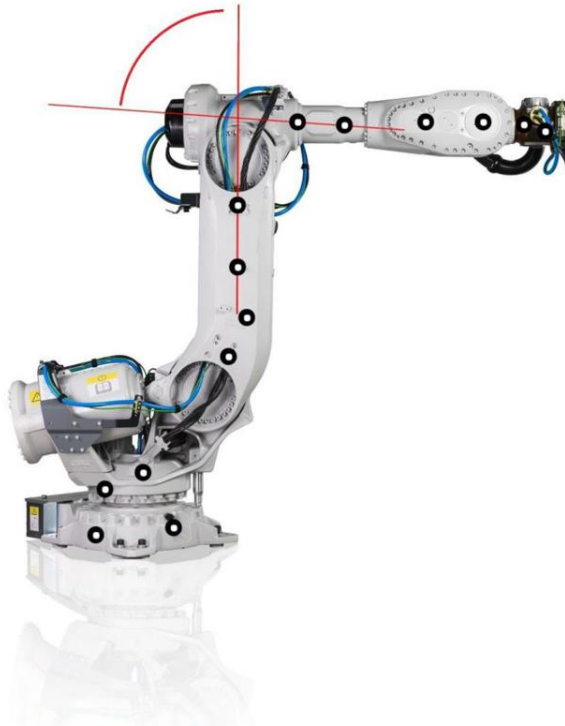
- Porovnání trajektorie bodů v nezatíženém stavu proti stavu při vrtání – body v oblasti elektro-vřetene.
- Vyhodnocení celkové tuhosti robotu – celková řezná síla / celková odchylka polohy elektro-vřetene.



Obr. 34) Celková tuhost

Tuhost jednotlivých kloubů

- Vytvoření přímek z měřicích bodů na každém rameni
- Vyhodnocení průběhu odchylky úhlu v nezatíženém stavu proti stavu při vrtání.
- Získání průběhu krouticího momentu v jednotlivých pohybových osách robotu
- Výpočet průběhu tuhosti v natočení každého kloubu $cn = M / \alpha$
- Zhodnocení každého kloubu



Obr. 35) Vyhodnocení tuhosti kloubů

Opotřebení vrtáku

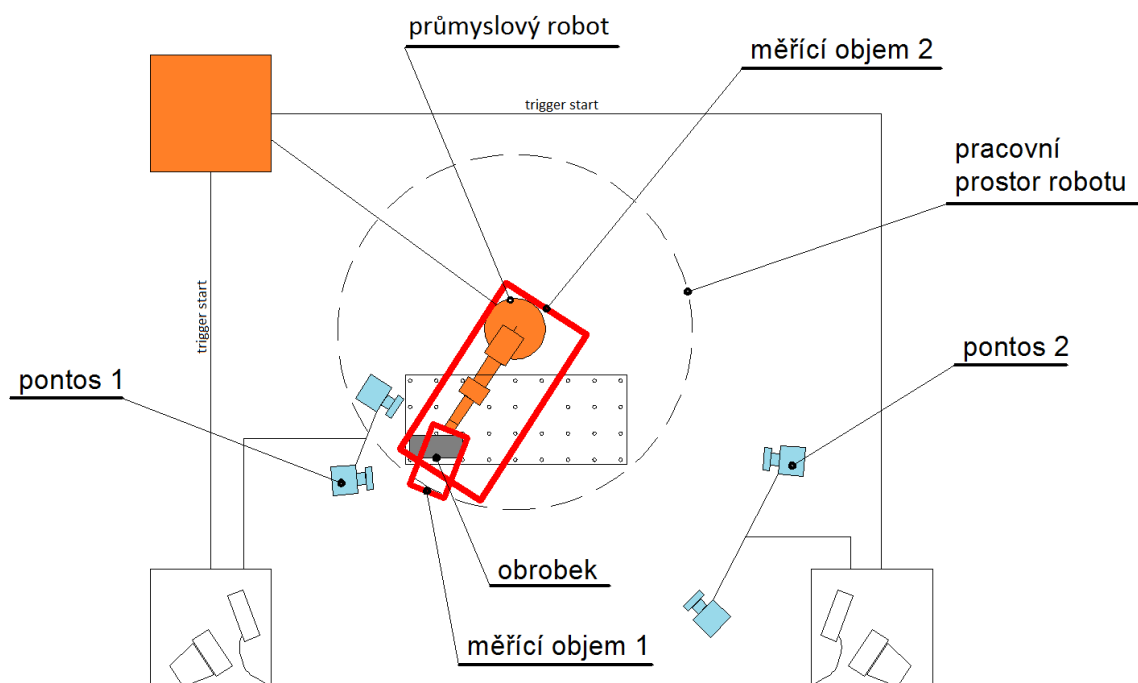
- Měření opotřebení vrtáku pomocí DMG Microset VIO 20150 Linear
- Zhodnocení vlivu jednotlivých řezných podmínek na opotřebení nástroje

10 VLASTNÍ MĚŘENÍ

10.1 Schéma pracoviště

Měření probíhalo v nástrojárně ve Škodě Auto Mladá Boleslav na průmyslovém robotu ABB IRB-6700-150 na lineárním vedení v uzavřené buňce. Pro měření byly použity dva systémy Pontos. Jeden systém snímal pouze vrtací vřeteno (měřící objem 1). Sloužil k vyhodnocení celkové odchylky vřetena v průběhu vrtání – celková tuhost robotu.

Druhý systém Pontos snímal robot od pohybové osy A3 až A6 (dále budeme značit ArX). Data z tohoto systému byla použita pro vyhodnocení tuhosti jednotlivých kloubů a ramen. Na obr. 36 je znázorněno schéma pracoviště.



Obr. 36) Zjednodušené schéma pracoviště

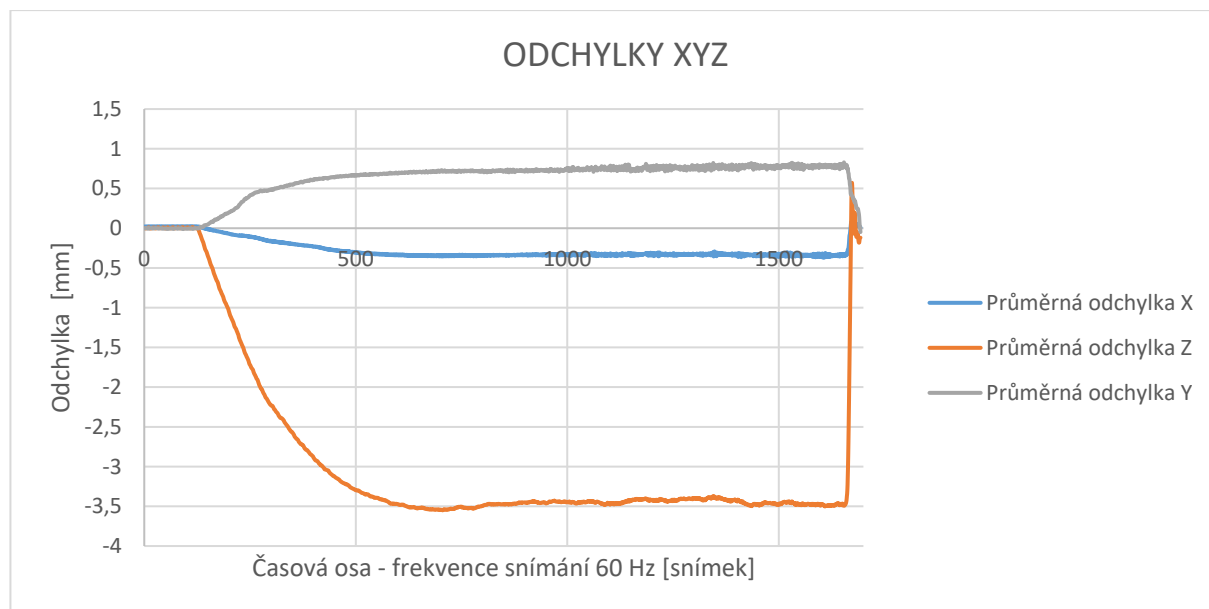
10.2 Přípravné měření

V prostorách firmy MCAE Systems s.r.o. proběhlo přípravné měření za účelem ověření postupu měření systému Pontos 1. Měření probíhalo na robotu Kuka KR60. Řezné podmínky byly zvoleny podobné jako poté u robotu ABB. Podmínky jsou v tabulce 7.

Tab 7) Podmínky přípravného měření

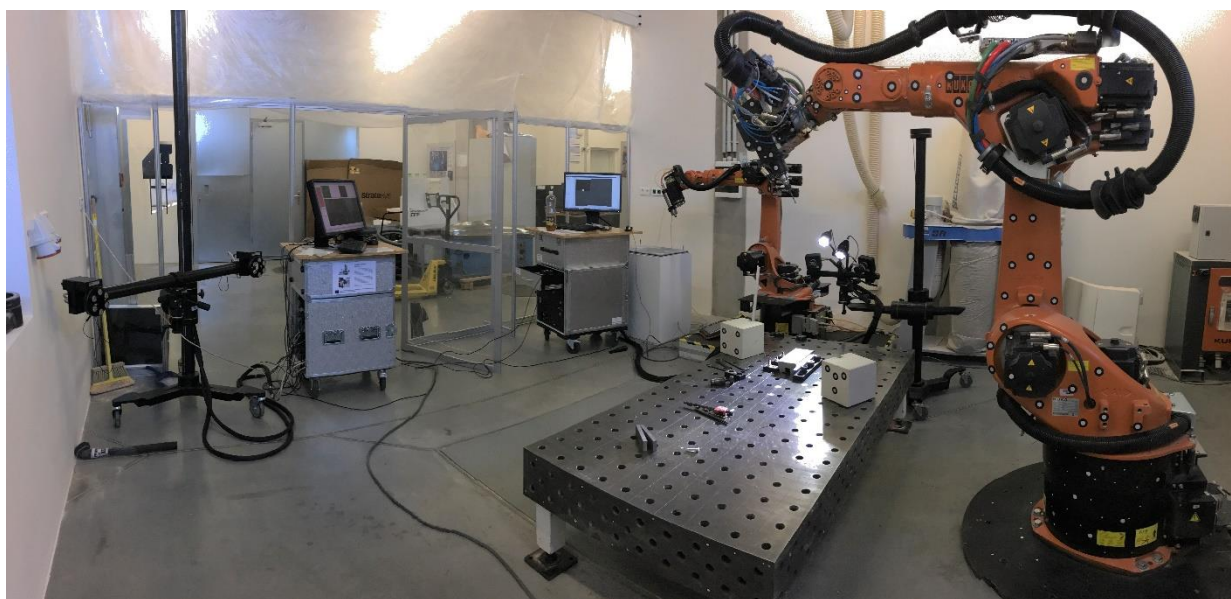
Šroubovitý vrták – průměr	6 mm
Materiál	ČSN 12050
Otáčky	1100 ot/min
Posuvová rychlost	55 mm/min

Vrtání proběhlo u konce dosahu robotu. Na obr. 37 jsou v grafu znázorněné odchylky ve směrech X, Y a Z při vrtání robotem Kuka. Směr osy Z je totožný s osou nástroje. Směr osy X směřuje od nástroje do kořene robotu a směr Y je na něj kolmý. Na obr. 38 je pracoviště přípravného měření v MCAE Systems s.r.o.



Obr. 37) Odchylky trajektorie vřetene u přípravného měření

Odchylka Z dosahuje hodnoty 3,5 mm, odchylka Y hodnoty 0,5 mm a hodnota odchylky X téměř 1 mm. Celková řezná síla je u tohoto vrtání 827 N. Výsledná průměrná tuhost při vrtání je tedy **235,5 N/mm**.



Obr. 38) Přípravné měření v prostorách MCAE Systems

10.3 Vrtání a jeho značení

Byly vytvořeny programy pro vrtání. V jednotlivých vrtáních se měnila pouze hodnota posuvu pro vrtání. Otáčky byly konstantní (1200 ot/min). Vrtání probíhalo následovně:

1. Nájezd vřetene do výšky 10 mm nad obrobek rychloposuvem
2. Zapnutí vrtacího vřeteníku
3. Vrtací posuv a následné vrtání
4. Odjezd vřetene rychloposuvem
5. Posunutí obrobku o potřebnou délku pro vyvrtání dalšího otvoru

Vrtání proběhlo vrtákem o průměru 6,8 mm do hloubky 30 mm.

Bylo zavedeno následující značení jednotlivých vrtání, které je uvedeno na příkladu:

A11

První písmeno značí polohu robotu vůči jeho kořenu.

- A – oblast v polovině dosahu robotu pro vertikální vrtání – „ideální poloha“
- B – oblast v blízkosti kořene robotu pro vertikální vrtání
- C – oblast na konci dosahu robotu pro vertikální vrtání
- H – oblast pro horizontální vrtání v polovině dosahu robotu

První číslice značí hodnotu posuvu pro vrtání.

- 1 – posuv 40 mm/min
- 2 – posuv 50 mm/min
- 3 – posuv 60 mm/min
- 4 – posuv 70 mm/min
- 5 – posuv 80 mm/min
- 6 – posuv 100 mm/min

Druhá číslice značí o kolikáté vrtání se jednalo v rámci jedné hodnoty posuvu. Každý vrtací posuv byl opakován 5x kvůli dostatečnému počtu opakování pro statistické vyhodnocení.

Na uvedeném příkladě A11 se tedy jedná o první vertikální vrtání v oblasti poloviny dosahu robotu s vrtacím posuvem 40 mm/min.

Pokud bylo mezi první a druhou číslicí uvedeno označení **ref**, jedná se o referenční vrtání – vrtání bez zatížení (bez obrobku).

Po provedení všech pěti vrtání s jedním posuvem byl vyměněn vrták za nový.

10.4 Příprava robotu a měřících systémů pro měření

10.4.1 Měřící objemy a velikost bodů

Měřící objem 1

Snímání elektrovřetene. Byla změřena přibližná velikost měřícího objemu. Z přílohy č.5 byl určen přesný měřící objem a odečteny hodnoty potřebné pro kalibraci systému Pontos – proběhlo nastavení vzájemného úhlu kamer, jejich ostření, nastavení clony a kalibrace na daný

kalibrační kříž. Velikost měřicího objemu 1: **535 x 420 x 420 mm**. Pro takový měřicí objem jsou vhodné referenční body o velikosti: 8 mm.

Systém Pontos 1 byl nakalibrován na přesnost **0,0021 mm**.

Měřicí objem 2

Snímání průmyslového robotu. Postup byl stejný jako v případě měřicího objemu 1. Velikost měřicího objemu 2: **2000 x 1450 x 1450 mm**. Pro takový měřicí objem jsou vhodné referenční body o velikosti 25 mm. Byly použity reflexní body z důvodu vybavení měřicího zařízení Pontos 2 spínanými blesky. Pontos 1 je vybaven led lampami.

Systém Pontos 2 byl nakalibrován na přesnost **0,0048 mm**.



Obr. 39) Kalibrace systémů na kříže

Reflexní body velikosti 25 mm byly nalepeny na snímáný objekt (průmyslový robot) na stranu viditelnou od systému Pontos 2. Body o velikosti 8 mm byly nalepeny pouze na elektrovřeteno.

10.5 Fotogrammetrie

Pro totožné ustavení jednotlivých vrtání byl použit systém Tritop. Do oblasti měřících objemů 1 a 2 byly umístěné betonové kostky polepené příslušnými referenčními body o velikostech 8 mm a 25 mm. Tyto kostky budou sloužit pro ustavení jednotlivých vrtání na stejný souřadný systém. Průmyslový robot byl nafocen ze všech potřebných úhlů a stran pro zakódování a určení polohy měřících bodů. Postup pro ustavení bude rozveden v 11.1.

Souřadný systém byl zvolen následovně:

- Osa X – směřuje vždy od osy elektrovřetene do kořene robotu
- Osa Z – je určena osou vrtání a směřuje od obrobku
- Osa Y – kolmá na zbylé osy, směr je dán pomocí pravidla pravé ruky

Postup fotogrammetrie:

1. Naostření a nastavení blesku kamery Tritop
2. Umístění betonových kostek do měřících objemů

3. Rozmístění kódovaných bodů a kalibračních tyčí do prostoru kolem průmyslového robotu
4. Pořízení snímků z různých poloh a úhlů

Fotogrammetrie byla nutná po každé změně pozice pro vrtání. Celkem máme tedy 4 projekty fotogrammetrie (pozice A, B, C, H).

10.6 Měření

Spouštění měření u obou systémů Pontos probíhalo pomocí dálkového spouštění (trigger) současně během nájezdu elektrovřetene pracovním posuvem. Snímána byla tedy část nájezdu vrtáku, samotné vrtání a část odjezdu vrtáku. První měření probíhalo na pozici A (polovina dosahu robotu). Následovalo vyhodnocení a nalezení optimálního posuvu na základě odchylky polohy elektrovřetene od referenční dráhy. Poté proběhlo ověření v oblastech B, C a H. Referenční dráha byla získána měřením vrtání bez zatížení (bez obrobku), které bylo pro každý posuv provedeno jen 3x z důvodu časové náročnosti celého měření a dodržení předepsané opakovatelnosti vedení po dráze u robotu ABB (0,14 mm). Opakovatelnost vedení po dráze bez zatížení byla testována a odchylka nepřekročila 0,05 mm.

Frekvence snímání u systému Pontos 1 byla zvolena na 60 Hz z důvodu potřeby vyhodnocení vibrací. Nastavení vyšší frekvence snímání by znamenalo nárůst času zpracování dat počítačem a zvětšení velikosti jednotlivých projektů (projekt = záznam jednoho vrtání). Např. velikost záznamu s vrtacím posuvem 40 mm/min se pohybovala kolem 15 GB paměti počítače.

Frekvence snímání systému Pontos 2 byla zvolena na 10 Hz. Vyšší frekvence snímání, při dané časové délce měření, systém nezvládal. Snímky se během měření ukládají do paměti kamer, až po měření se přenášejí do paměti počítače. RAM paměť kamer byla pro takovou délku měření malá. Ze systému Pontos 2 nebyly vyhodnocovány vibrace.

Jednotlivá vrtání o stejném posuvu byla opakována tedy 5x, snímání referenční dráhy pouze 3x.



Obr. 40) Měřicí systémy a průmyslový robot ABB

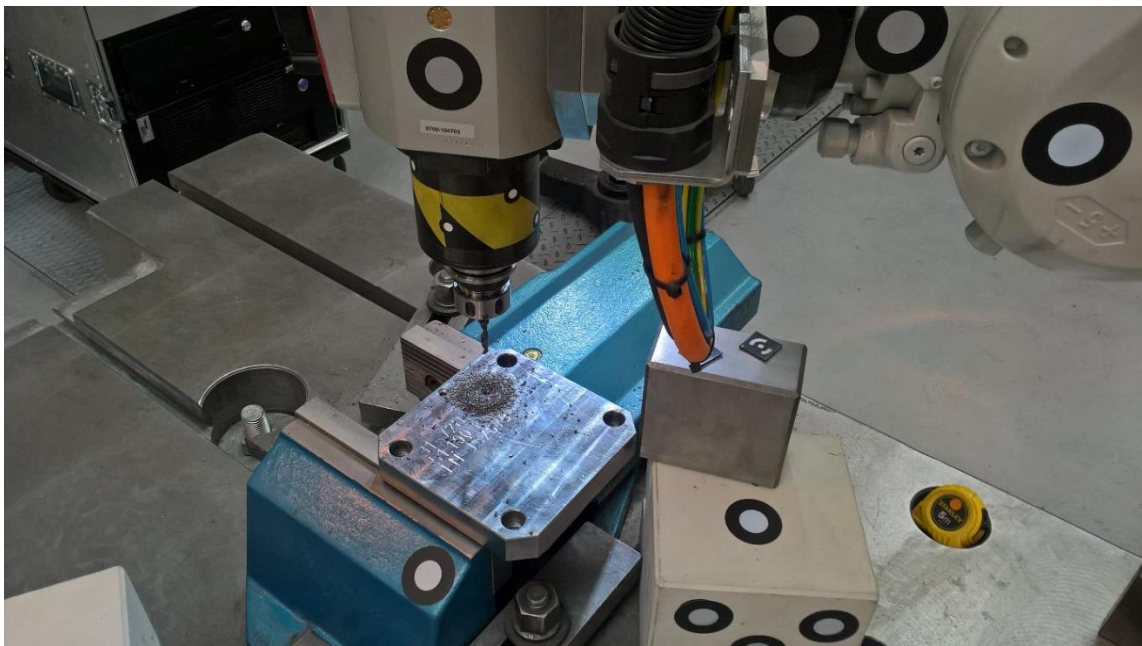
Příklad průběhu vrtání s posuvem 40 mm/min:

A) Referenční měření

1. Spuštění projektů na obou počítačích
2. Nastavení potřebného počtu snímků pro posuv 40 mm/min
 - a. Pontos 1 – 60 Hz
 - 10 mm nájezd + 30 mm vrtání = 15s + 45s + 5s odjezd = 65s x 60Hz = 3900 snímků
 - b. Pontos 2 – 10 Hz
 - 10 mm nájezd + 30 mm vrtání = 15s + 45s + 5s odjezd = 65s x 10Hz = 650 snímků
3. Spuštění programu robotu + spuštění záznamu
4. Referenční vrtání
5. Ukončení záznamu, přepoččet a uložení
6. 3 opakování postupu pro referenční měření

B) Měření při zatížení (vrtání)

1. Spuštění projektů na obou počítačích
2. Upnutí obrobku
3. Nastavení potřebného počtu snímků pro posuv 40 mm/min
 - a. Pontos 1 – 60 Hz
 - 10 mm nájezd + 30 mm vrtání = 15s + 45s + 5s odjezd = 65s x 60Hz = 3900 snímků
 - b. Pontos 2 – 10 Hz
 - 10 mm nájezd + 30 mm vrtání = 15s + 45s + 5s odjezd = 65s x 10Hz = 650 snímků
4. Spuštění programu robotu + spuštění záznamu
5. Vrtání
6. Ukončení záznamu, přepoččet a uložení
7. Posun obrobku o potřebnou délku pro další otvor
8. 5 opakování postupu pro měření

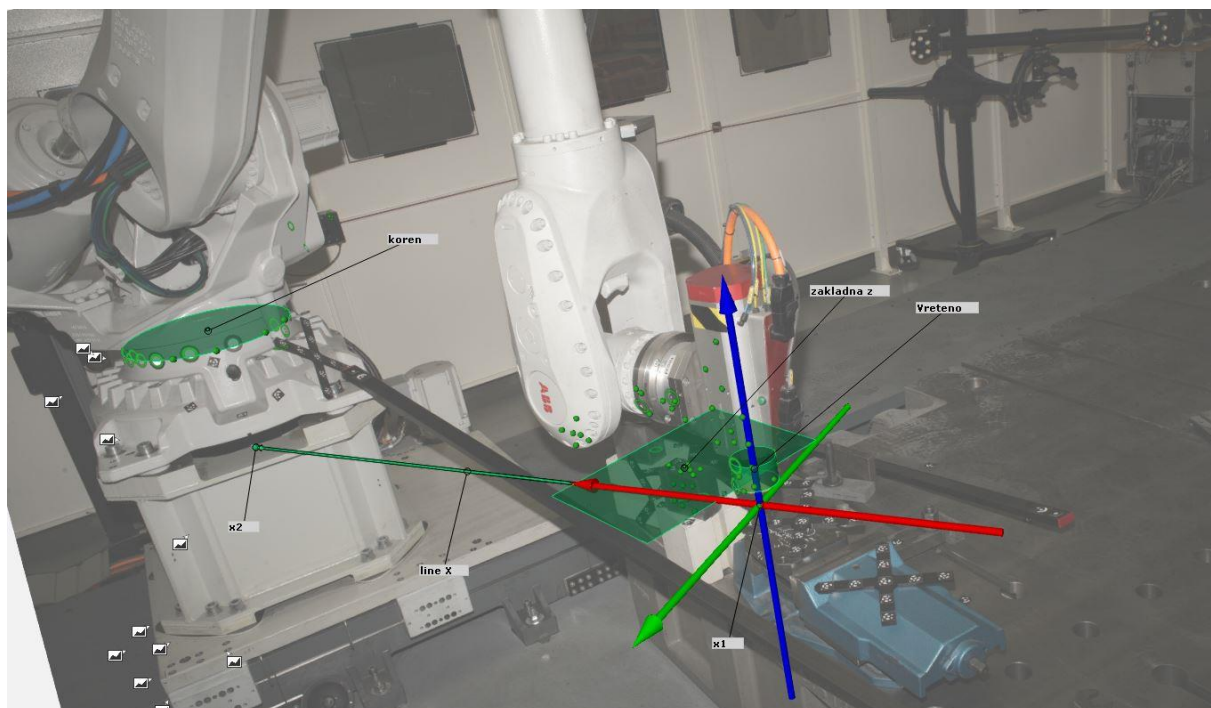


Obr. 41) Vyvrtaná díra

11 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

11.1 Souřadný systém

Souřadný systém byl vytvořen pomocí fotogrammetrie v softwaru Tritop 2016. Pomocí fotogrammetrie známe polohu jednotlivých referenčních bodů. Na ustavení byly využity body v oblasti osy A1, v oblasti elektrovřetene a na betonových kostkách – z těchto bodů bylo následně vytvořeno několik ustavovacích geometrických elementů. Jednotlivé geometrické elementy můžeme vidět na obr. 42.



Obr. 42) Ustavení v pozici B

Z bodů na elektrovřeteni byl vytvořen válec, jehož osa definovala osu Z.

1. Odebrány 4 stupně volnosti

Rovina Z byla vytvořena z bodů ležících na betonových kostkách.

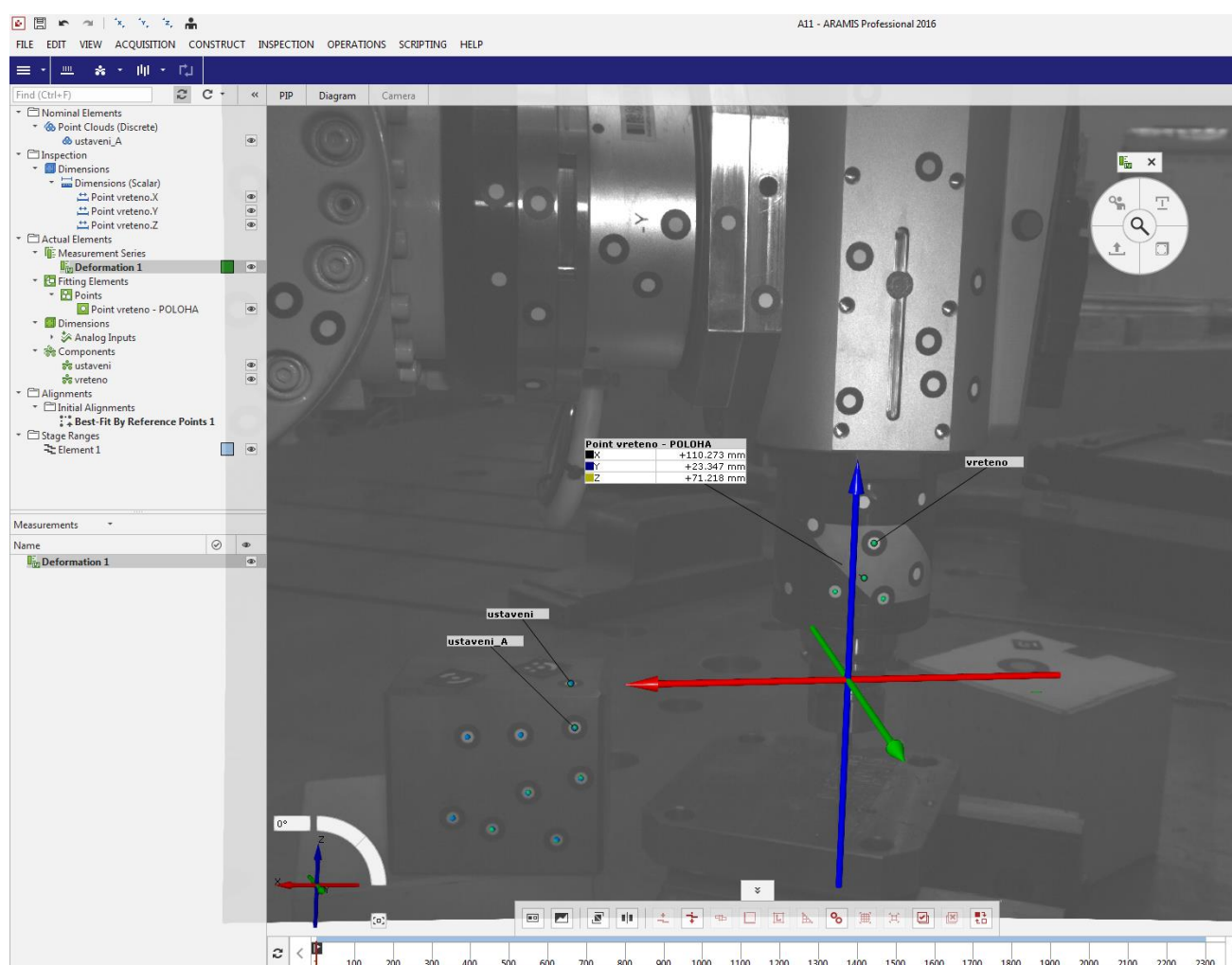
2. Odebrán další stupeň volnosti

Z bodů na ose A1 byla vytvořena kružnice – střed kružnice byl vyprojektován na rovinu Z. Průsečnicí osy válce vřetene s rovinou Z byl vytvořen druhý bod. Spojnice těchto dvou bodů tvoří osu X – směr od vřetene do osy rotace robotu A1 (teoretický koreň robotu v rovině Z)

3. Vyčerpán poslední stupeň volnosti

Ustavení tedy proběhlo pomocí funkce Alignment by Geometric elements (ustavení pomocí geometrických elementů) na osu vrtání (osa vřetene) a spojnicí prvního (projekce středu kružnice na rovinu Z) a druhého bodu (průsečík osy vřetene a roviny Z).

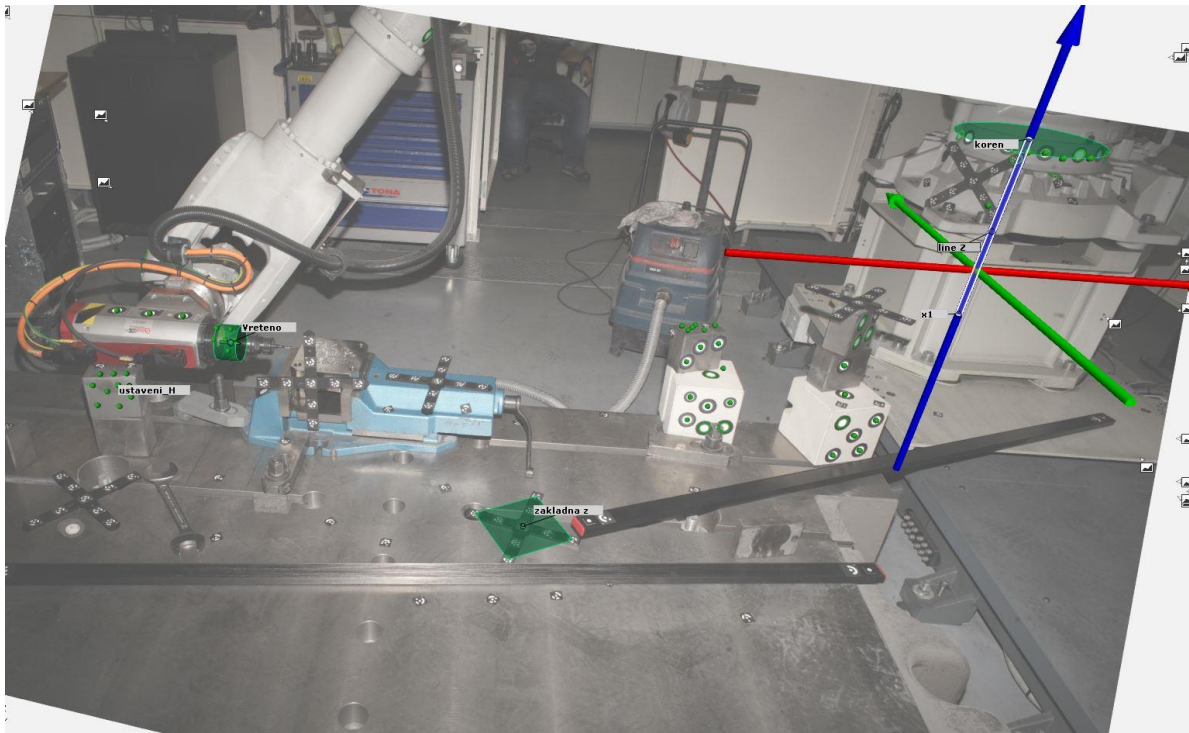
Aby se dala jednotlivá měření ustavit tímto principem bylo by nutné, aby v záběru obou systémů Pontos byly vidět všechny tyto geometrické elementy. Proto byly použity betonové kostky, ležící v měřících objemech obou systémů Pontos. Tyto kostky během celého měření nemění svou pozici. Z referenčních bodů nalepených na těchto kostkách byl vytvořen tzv. bodový mrak (point cloud), který si uchovává souřadný systém, ve kterém byl vytvořen. Tento element byl vyexportován z projektu fotogrammetrie a importován do jednotlivých měření systémů Pontos, kde byl svázán s „viditelnou“ kostkou funkcí Alignment by Reference points (ustavení pomocí referenčních bodů). Tímto způsobem byl zaručen totožný souřadný systém pro všechna měření. Na obr. 43 vidíme element **ustavení A** – referenční point cloud, a element **ustavení** – aktuální point cloud (viditelný ze systému Pontos 1).



Obr. 43) Importovaný element ustavení A s daným souřadným systémem a aktuální element ustavení svázaný s importovaným elementem

Fotogrammetrie byla opakována pro všechny oblasti vrtání (A, B, C), tvorba souřadného systému a ustavení jednotlivých měření proběhla stejným způsobem.

Souřadný systém pro horizontální vrtání byl vytvořen podobně, ale osa X je definována směrem vrtání a osa Z je definována osou kružnice vytvořené na ose A1. Elementy pro vytvoření souřadného systému vidíme na obr. 44.



Obr. 44) Vytvoření souřadného systému pro horizontální vrtání

11.2 Způsob vyhodnocení záznamů ze systému Pontos 1

Po naměření všech posuvových sil vrtání potřebujeme získat trajektorie vřetene a ty následně zpracovat v programu MS Excel. Jednotlivé trajektorie získáme z jednotlivých projektů (záznamů) ze systému Pontos. Výsledky byly zpracovány v softwaru Aramis Proffesional 2016, který umožňuje práci s referenčními body umístěnými na měřeném objektu.

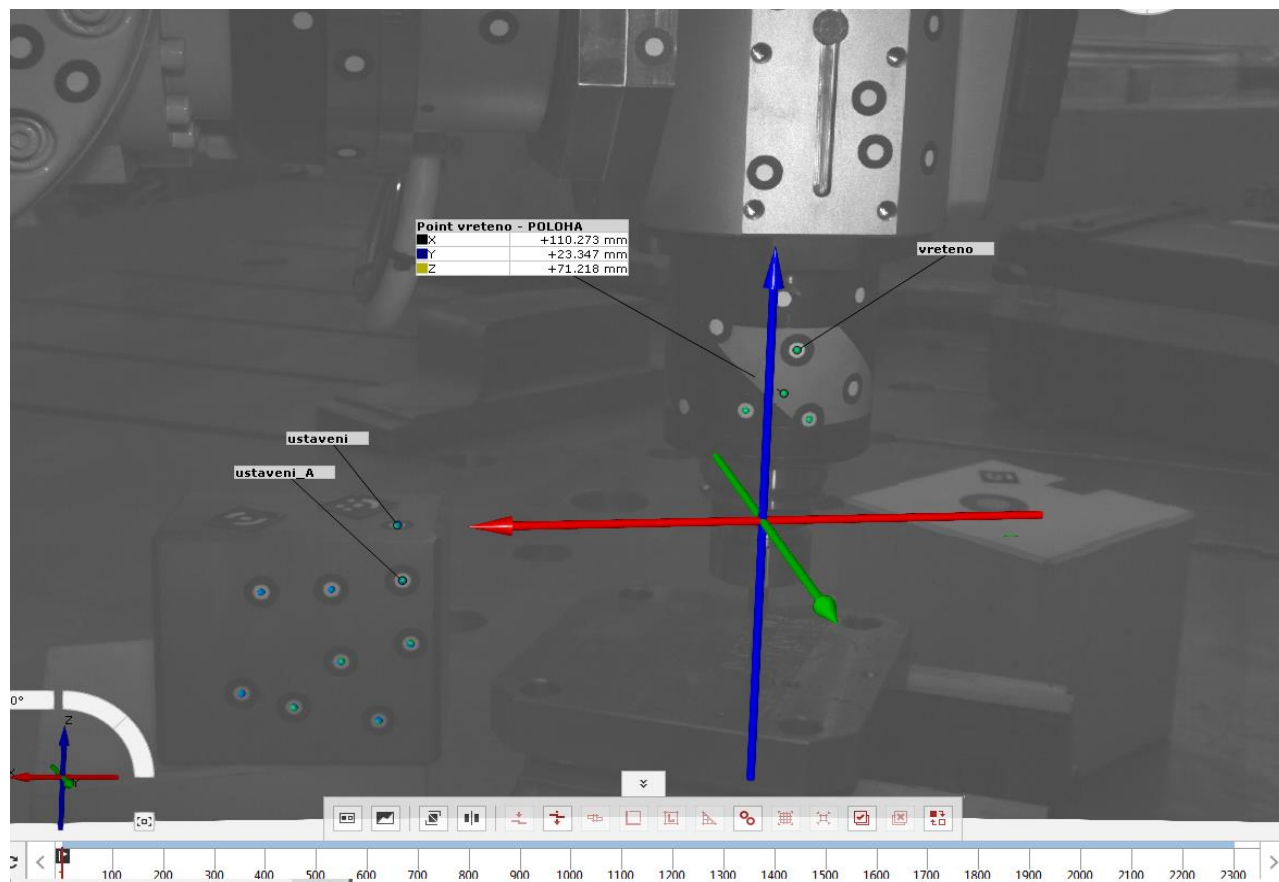
11.2.1 Postup práce v softwaru Aramis Proffesional 2016

Nejprve je nutné vytvořit point componenty (bodové komponenty), které definují jednotlivá tuhá tělesa v záznamu, se kterými se bude dále pracovat. Při postupu musíme vytvořit elementy, které jsou na obr. 45. První point component - **ustavení** - je vytvořen z bodů umístěných na betonové kostce, která bude následně použita pro ustavení na souřadný systém. Druhý point component - **vřeteno** - je nutné vybrat z bodů umístěných na vřeteni - byly vybrány tři body dobře viditelné v celém průběhu vrtání.

Následuje import elementu **ustavení A**, získaného ze zpracované fotogrammetrie (kap. 11.1), který si zachovává vytvořený souřadný systém. Dále je potřeba svázat element **ustavení** s **elementem ustavení A** pomocí funkce Alignment By Reference points (ustavení pomocí referenčních bodů) - tím je vytvořen správný souřadný systém pro vyhodnocení. Následuje

vytvoření bodu z elementu **vřeteno**. U tohoto bodu vyneseme jeho okamžitou polohu v osách X, Y, Z. Hodnoty polohy ze všech snímků záznamu vyexportujeme do programu MS Excel.

Tento postup je shodný, jak pro referenční měření (vrtání bez zatížení), tak i pro vrtání do kovu.



Obr. 45) Zobrazená pozice bodu na vřeteni

11.2.2 Skript

Předchozí postup pro práci v softwaru Aramis by byl nutný zopakovat u všech měření – celkem 72 měření. Bylo by to časově velice náročné. Byl vytvořen skript přímo v programu Aramis, který výrazně redukuje čas vyhodnocení. Náhled skriptu je zobrazen na obr. 46.

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2
3  import gom
4  gom.script.sys.show_stage (stage=gom.app.project.stages['Stage 1'])
5
6  gom.script.sys.import_gom_inspection_exchange (
7      files=['C:/Users/user/Desktop/ustaveni_C.xml'],
8      import_mode='new_elements')
9
10 gom.script.cad.convert_to_nominal_element (elements=[gom.app.project.actual_elements['ustaveni_C']])
11
12 gom.script.inspection.measure_by_no_measuring_principle (elements=[gom.app.project.inspection['ustaveni_C']])
13
14 MCAD_ELEMENT=gom.script.component.create_point_component (
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27 MCAD_ELEMENT=gom.script.component.create_point_component (
28     add_points=[gom.Point3d (-1.62402635e+02, -1.07107726e+02, 1.88987070e+00, 1006), gom.Point3d (-1.02675
29     automatic_min_points=True,
30     automatic_threshold=True,
31     component_type='rigid_body',
32     identification_element=gom.app.project.actual_elements['actual_master'],
33     identification_threshold=2.69744923e-01,
34     identify_independently_of_other_point_components=True,
35     min_identification_points=5,
36     name='ustaveni',
37     point_definition_stages={'1006': gom.app.project.stages['Stage 1'], '1007': gom.app.project.stages['Sta
38     properties=gom.Binary ('eAG9V09oHFUc/q2tbYzGNFZFRXTYJia1bv5ZY11ITE20ShmK0aEiroEuy001Gd2c3M10TVKvTW64exKu
39
40 CAD_ALIGNMENT=gom.script.alignment.create_best_fit_by_reference_points (
41     actual_element=gom.app.project.actual_elements['ustaveni'],
42     alignment_stage_creation_policy='same_alignment_for_each_stage',
43     definition_stage={'absolute_range': 2.30000000e+03, 'mode': 'index_relative', 'proxy_relative': False,
44     name='Best-Fit By Reference Points 1',
45     nominal_element=gom.app.project.inspection['ustaveni_C'],
46     parent_alignment=gom.app.project.alignments['Original alignment'],
47     search_distance=5.00000000e+00)
48
49 gom.script.view.show_coordinate_system_in_origin ()
50
51 gom.script.selection3d.select_all_points_of_element (elements=[gom.app.project.actual_elements['vreteno']])
52
53 MCAD_ELEMENT=gom.script.primitive.create_fitting_point (
54
55

```

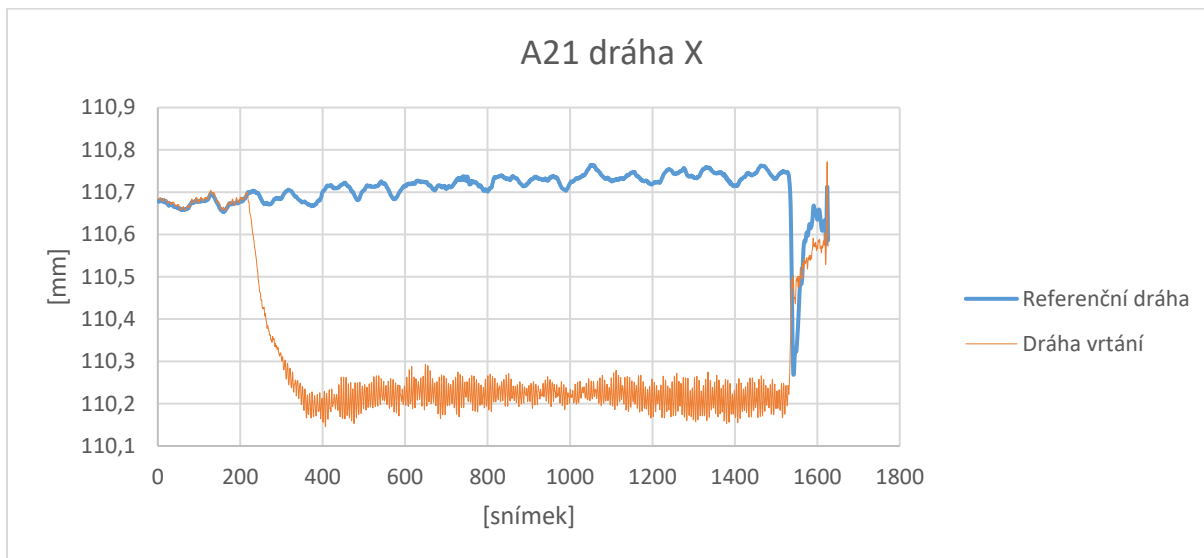
Obr. 46) Náhled skriptu

Funkce skriptu

1. Import point cloud – **ustaveni C**
2. Převod aktuálního elementu **ustaveni C** na nominální element
3. Vytvoření point component – **vreteno, ustaveni**
4. Ustavení elementu **ustaveni** na element **ustaveni A** – souřadný systém definován
5. Vytvoření bodu z elementu **vreteno** - **Point vreteno**
6. Zobrazení polohy bodu **Point vreteno** vzhledem k souřadnému systému
7. Přepočet souřadného systému a polohy bodu **Point vreteno** ve všech snímcích
8. Vynesení polohy bodu **Point vreteno** do tabulky
9. Export tabulky ve formátu csv.

11.2.3 Vyhodnocení v MS Excel

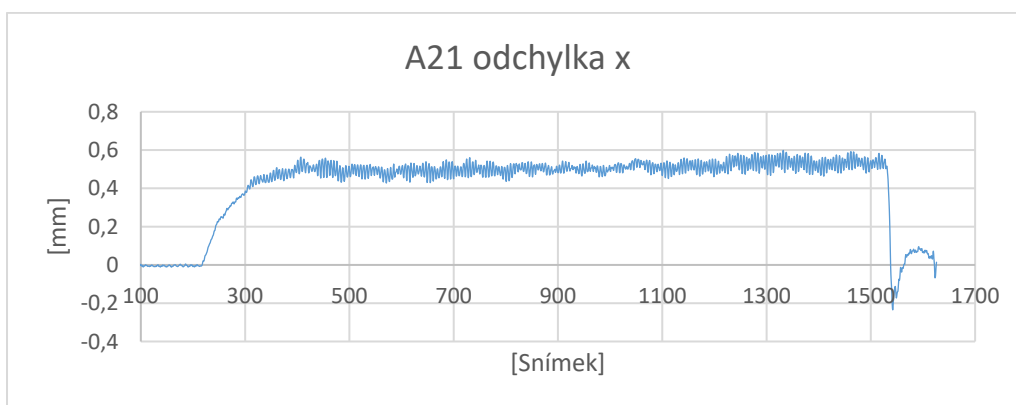
Do jednoho sešitu MS Excel pro jednu posuvovou rychlost nahrajeme data z osmi měření (3 referenčních + 5 vrtání se zátěží). Jelikož každé měření nezačínalo ve stejný okamžik, je nutné jednotlivá měření časově sesouhlasit – najít společný počáteční okamžik. Hodnoty polohy byly sesouhlaseny pomocí filtru hodnoty polohy vřetene v ose Z (osa vrtání) s tolerancí $\pm 0,005$, což je zanedbatelná hodnota proti vzniklým odchylkám v jednotkách milimetrů v ose Z a opakovatelnosti robotu vedení po dráze. Hodnoty byly sesouhlaseny v okamžiku, kdy robot ještě nevrtal – přesnost opakovatelnosti vedení po dráze 0,14 mm.



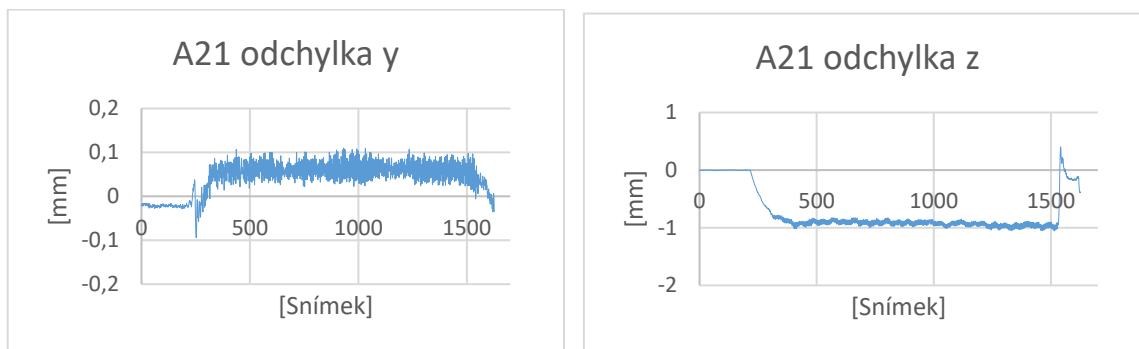
Obr. 47) Dráha vrtání A21

Na obr. 47 vidíme příklad dráhy referenční proti dráze při vrtání v ose X u posuvové rychlosti 50 mm/min v polovině dosahu robotu. Referenční dráha je tvořena průměrem tří opakování. Od prvního snímku až přibližně po snímek 200 robot najíždí svislým pracovním posuvem, poté začíná vrtat a dráha vrtání od dráhy referenční se vzdaluje o přibližně 0,5 mm. U referenční dráhy můžeme pozorovat amplitudu a frekvenci vlastního kmitání nástroje. U dráhy vrtání se amplituda kmitu zvyšuje a frekvence kmitu výrazně zvyšuje. Na konci vrtání dochází vlivem změny směru pohybu robotu k překmitu.

Na následujícím grafu je zobrazena odchylka předchozí referenční dráhy od dráhy při vrtání A21 ve směru osy X (navzájem odečtené hodnoty polohy – referenční-vrtání)



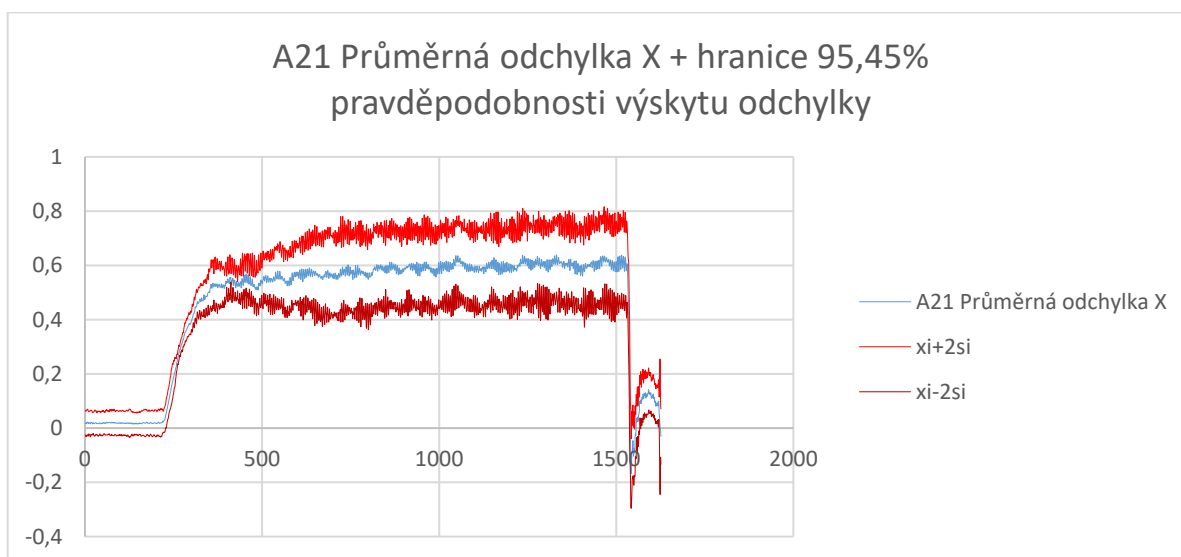
Obr. 48) Odchylka trajektorie vřetene při vrtání ve směru X



Obr. 49) a) Odchylka v ose Y

b) odchylka v ose Z

Po zprůměrování hodnot odchylek v jednotlivých osách všech pěti měření jedné posuvové rychlosti vrtání a výpočtu směrodatné odchylky byla vynesena do grafu průměrná odchylka + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky. Bylo použito pravidlo 2σ normálního Gaussova rozdělení pravděpodobnosti. Příklad výsledků je v následujícím grafu.



Obr. 50) Odchylka v ose X s hranicemi pravděpodobnosti

11.2.4 Vibrace

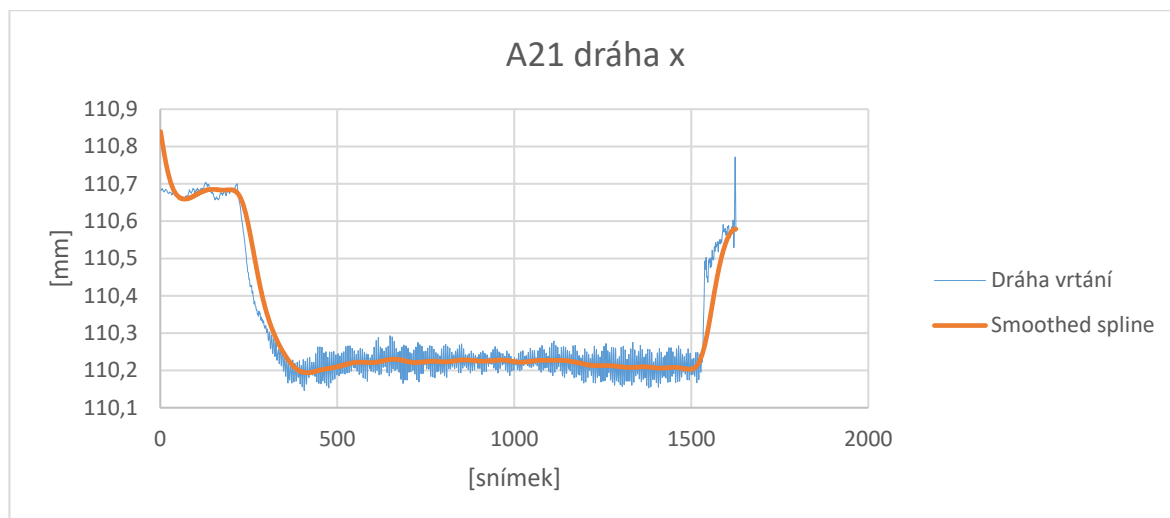
Pro vyhodnocení vzniklých vibrací byl zvolen způsob vytvoření smoothing spline (filter 1) v softwaru Aramis Proffesional z jednotlivých drah při vrtání ve všech třech osách.

Smoothing spline

Polynomický filtr, který minimalizuje křivosti. Software vytvoří nejvhodnější polynom druhého stupně přes všechny hodnoty. Vytváření křivky smoothing spline se řídí podle vzorce:

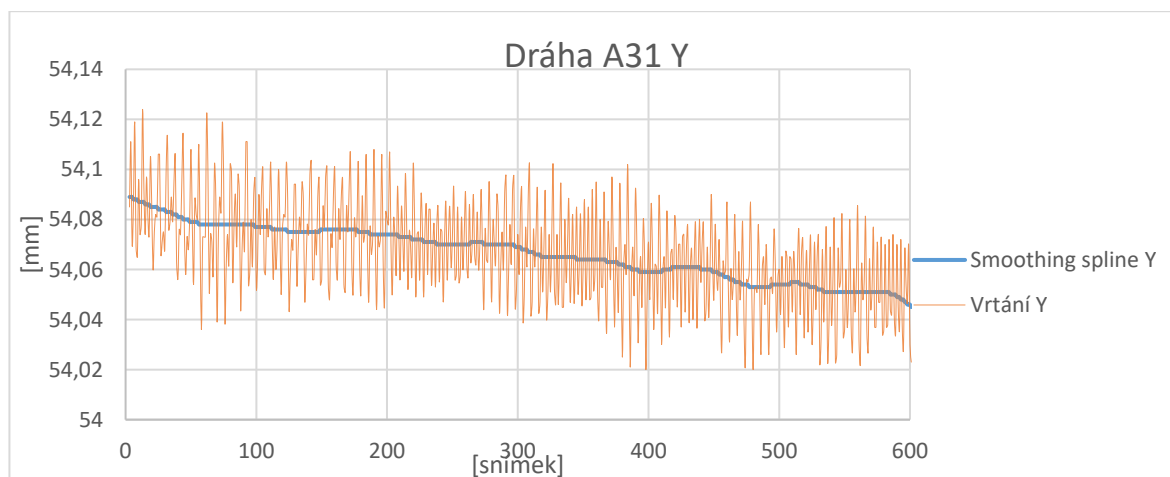
$$\min\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \mu(x_i))^2 + \lambda \sum_{i=1}^n (\mu''(x_i))^2\right) \quad (46)$$

Hodnota λ je volitelná od 0 – bez filtru (přímé spojnice mezi hodnotami) až po hodnotu 1000 – regresní přímka reprezentující všechny hodnoty.



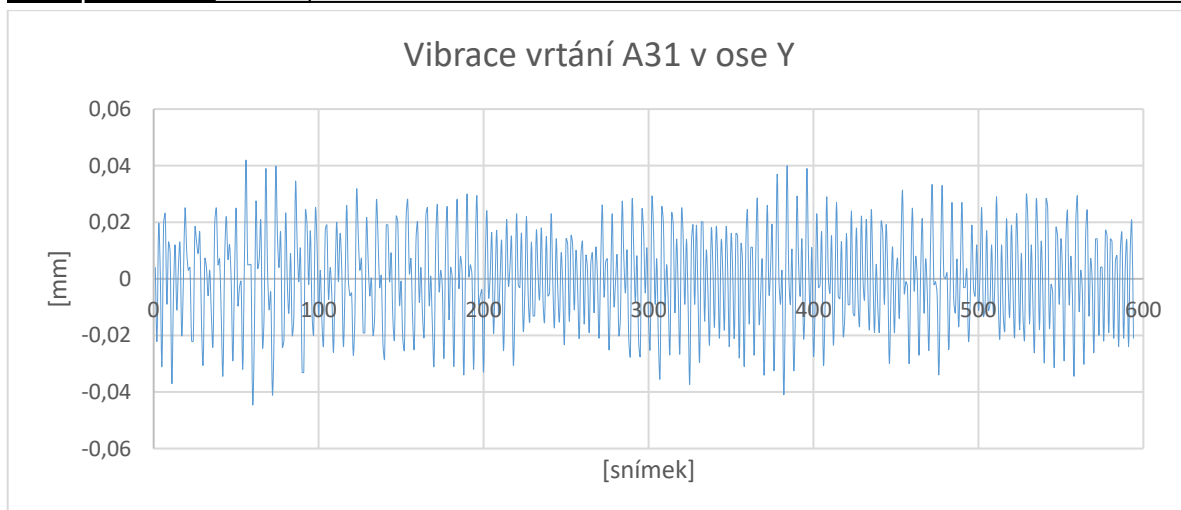
Obr. 51) Dráha vrtání A21 proložená křivkou smoothed spline

Na grafu (obr.51) vidíme proloženou křivku smoothed spline a trajektorii dráhy vrtání v ose X. Náběh vrtáku a jeho odjíždění značně zkresluje proloženou křivku smoothed spline, proto se budou vyhodnocovat vibrace jen při vrtání. Na následujícím grafu (obr.52) je oříznutá oblast vrtání – až v ní byla sestrojena křivka smoothing spline, aby nedošlo ke zkreslení.



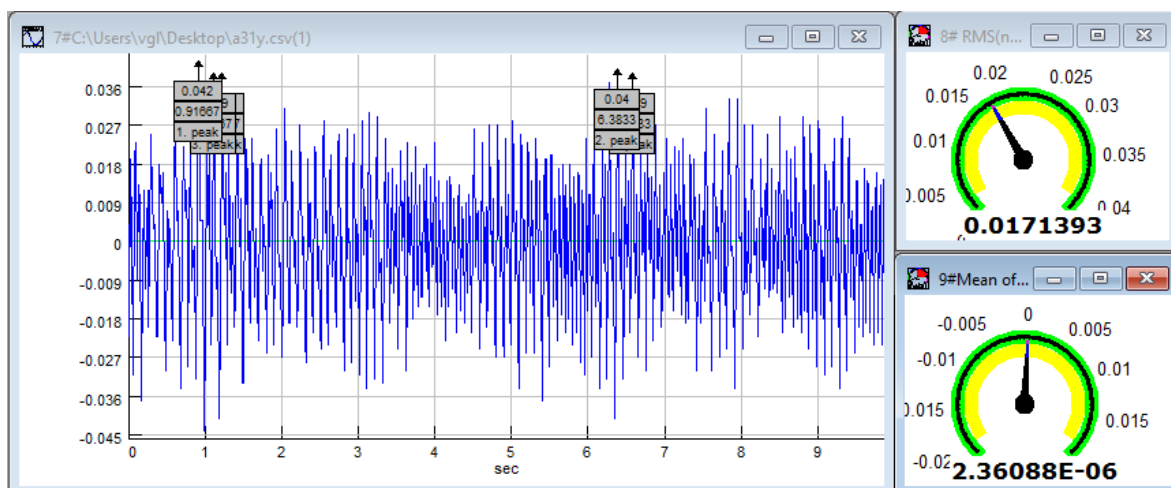
Obr. 52) Dráha vrtání A31 proložená křivkou smoothed spline

Při odečtení hodnot smoothing spline od hodnot dráhy vrtání vznikne následující graf (obr.53), který zobrazuje samotné kmitání – amplitudu a frekvenci.



Obr. 53) Vzniklé vibrace při vrtání A31

Hodnoty byly importovány do softwaru Sigview pro kontrolu vypočtených efektivních hodnot a pro kontrolu správnosti proložení dráhy křivkou smoothed spline – obr. 54.



Obr. 54) Ukázka ze softwaru Sigview

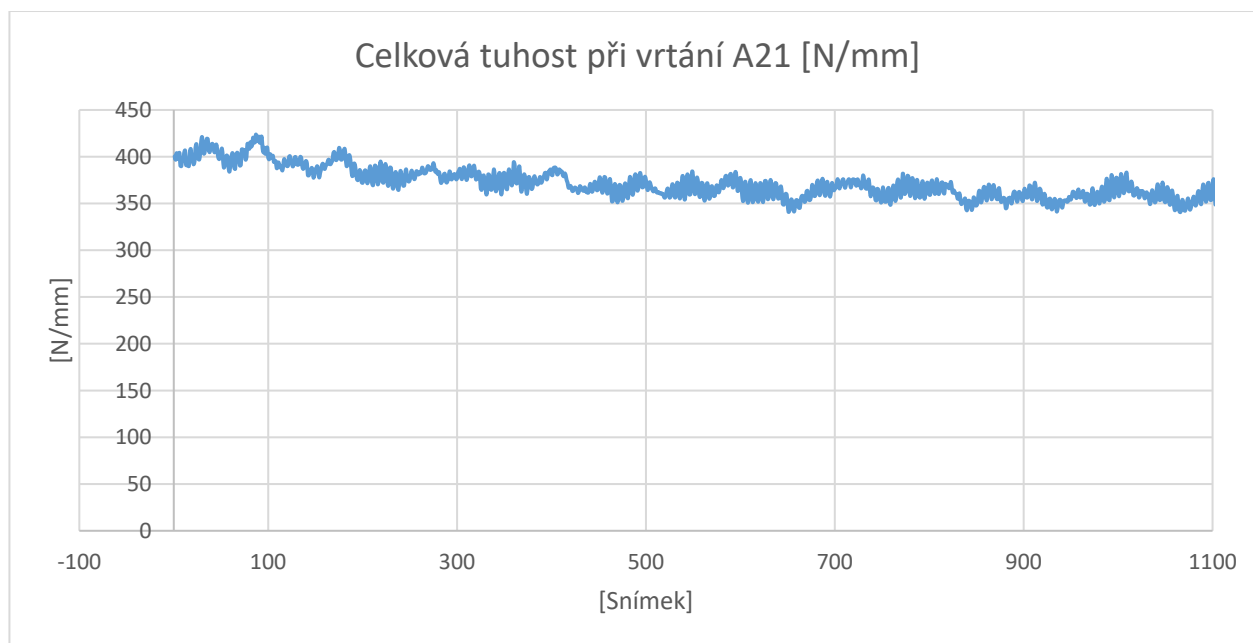
Průměr hodnot (mean) by se měl v ideálním případě rovnat nule nebo být v těsné blízkosti nuly, což bylo splněno.

Pro posouzení velikosti vibrací byla použita efektivní hodnota kmitání. Byla vypočítána ze všech vrtání ve všech třech osách, dále zprůměrována pro jednotlivé posuvové rychlosti a vypočtena její výslednice.

Zpracované kmitání je v příloze č.4.

11.2.5 Tuhost

Pro vyhodnocení celkové tuhosti budeme předpokládat, že obráběný materiál je homogenní – celková řezná síla je tedy v celém průběhu vrtání konstantní. Oblast výpočtu tuhosti zahrnuje jen samotné vrtání, příjezd a odjezd vřetene zde není – došlo by ke zkreslení údajů. Na grafu můžeme vidět průběh celkové tuhosti při vrtání posuvovou rychlostí 50 mm/min. Celková řezná síla je u tohoto posuvu 431,55 N.



Průměrná celková tuhost v posunutí u vrtání A21 je tedy **376,91 N/mm**.

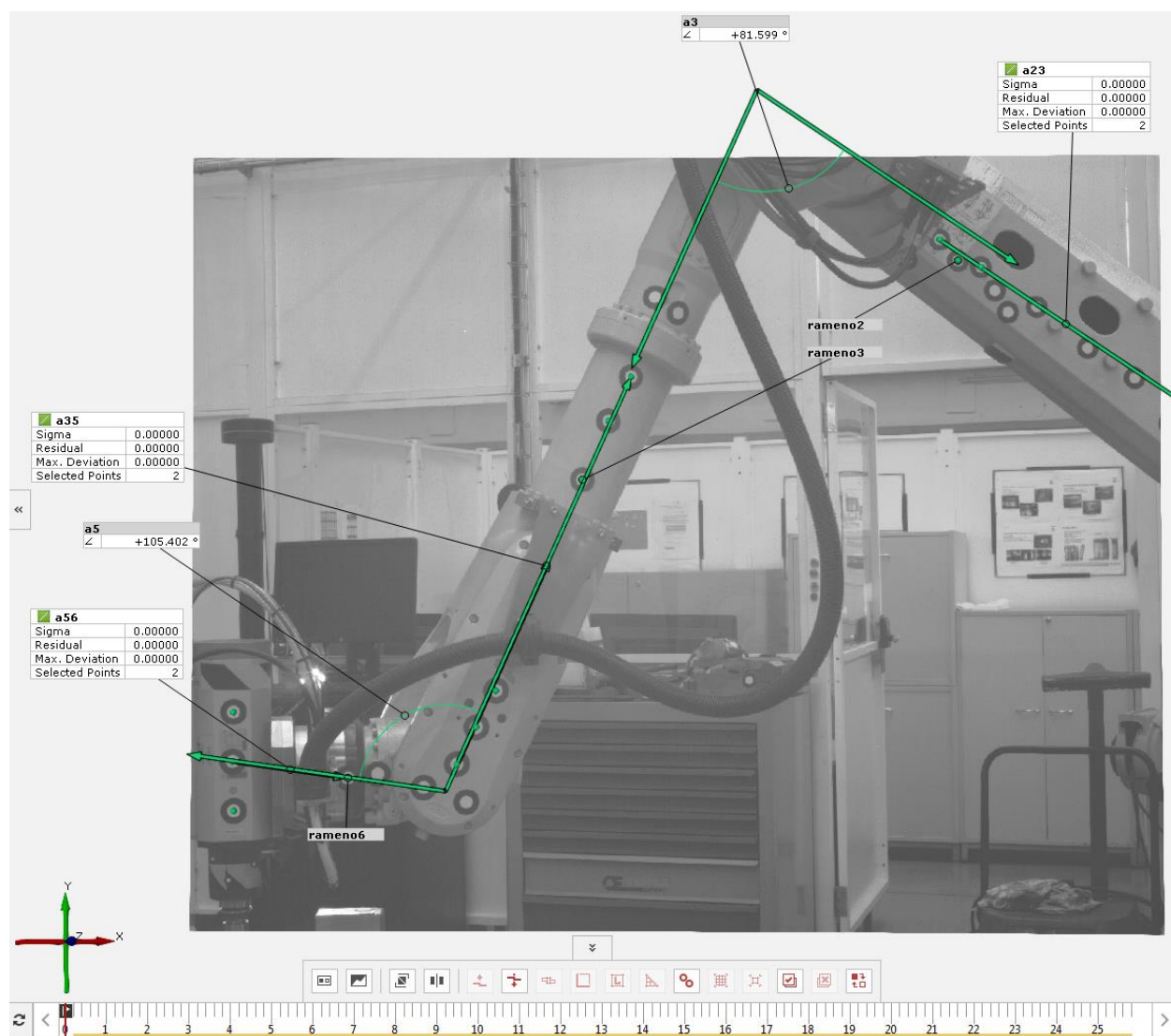
Zpracované hodnoty tuhostí jsou v příloze č. 2

11.3 Způsob vyhodnocení záznamů ze systému Pontos 2

Vyhodnocení pobíhalo podobným způsobem jako vyhodnocení ze systému Pontos 1. Byly vytvořeny následující prvky:

- komponenty z bodů, které definovali jednotlivé části ramene průmyslového robotu
- přímky, které nahradili jednotlivé části ramene
- mezi přímkami úhly, které definovali úhly natočení jednotlivých pohybových os robotu
- bod na vřetení a jeho souřadnice

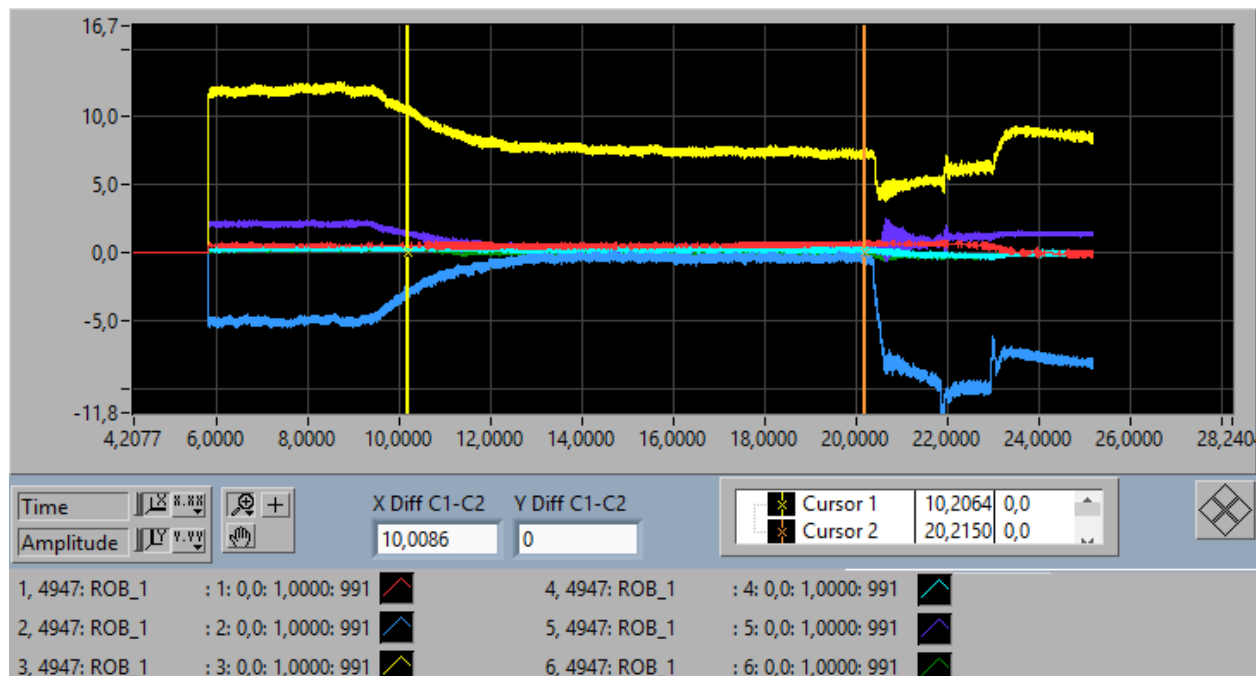
Opět byl vytvořen skript na zpracování těchto záznamů, který vyexportoval průběh úhlů a výškové souřadnice bodu na vřetení. Podle výškové souřadnice byla sesouhlasena jednotlivá měření vůči sobě. Na obr.55 je zobrazen náhled do softwaru Aramis 2016 s vyhodnocením dat ze systému Pontos 2.



Obr. 55) Ukázka z vyhodnocení Pontos 2

11.4 Vyhodnocení záznamů kroučících momentů

Pro záznam momentů jednotlivých pohybových os robotu byl použit software ABB Test Signal Viewer 1.6. Pomocí tohoto softwaru byly snímány kroučící momenty na osách Ar1 až Ar6 v průběhu vrtání. Software sleduje hodnoty se vzorkovací frekvencí 192 Hz. Hodnoty momentů jsou v Nm. Na obr. 56 je příklad záznamu z vrtání A61.



Obr. 56) Aplikace ABB test signal viewer – kroučící momenty z vrtání A61

Hodnoty na ose Y jsou v Nm a osa X je časová v sekundách. K vrtání dochází přibližně mezi 10 s až 20 s. Hodnoty momentů před svislou žlutou úsečkou představují nájezd vrtáku pracovní rychlostí a hodnoty po 20 s představují odjezd vrtáku rychloposuvem. Po začátku vrtání hodnoty momentů rostou / klesají a poté dochází k jejich ustálení na konstantní hodnotě. Tato hodnota bude použita pro vyhodnocení tuhosti v natočení. Můžeme si všimnout, že hodnoty momentů na osách Ar1, Ar4 a Ar5 jsou po celou dobu vrtání téměř nulové.

Musíme si uvědomit, že pro tuhost v natočení každého kloubu potřebujeme výchylku jeho kroučícího momentu, kterou způsobí řezné síly vrtání. Při záznamu momentů referenční dráhy (bez vrtání) zůstávají hodnoty téměř konstantní, s velikostí, jaká je před začátkem vrtání. Tyto velikosti momentů slouží k zajištění vedení robotu po zvolené dráze (vyrovnání samotné váhy robotu a zajištění pohybu). Výchylka momentů je tedy spočtena jako rozdíl hodnot momentů při referenční dráze a hodnot momentů při samotném vrtání

V následující tabulce č.8 je uveden příklad výpočtu výchylek momentů (rozdíl mezi referenčním úhlem a úhlem při zatížení), kdy jednotlivé hodnoty momentů byly určeny jako průměr z ustáleného stavu při vrtání.

Tab 8) Výchylka kroučících momentů při vrtání

Pohybové osy	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Ar5	Ar6
Referenční hodnoty [Nm]	0,816493	-4,82381	11,89384	0,197974	2,150874	0,20836
Vrtání [Nm]	0,519731	-1,55273	8,937266	0,293061	0,789017	0,103126
Výchylka [Nm]	0,296762	3,271077	2,95657	-0,09509	1,361857	0,105233

Uvedené hodnoty jsou z vrtání posuvovou rychlostí 100 mm/min – tedy vrtání, kde působí největší síly. U ostatních vrtání budou hodnoty výchylek nižší. Výchylka momentů na pohybových osách Ar1, Ar4 a Ar6 je velice nízká. Zároveň tyto osy nejsou použity k vyvolání pohybu pro vrtání – pouze udržují svou konstantní hodnotu při vrtání.

V průběhu zpracování dat ze systému Pontos 2 bylo zjištěno, že hodnota frekvence snímání byla příliš nízká a nedovoluje sesouhlasit jednotlivá měření podle výškové souřadnice vřetene. Vyšší frekvence snímání už dané zařízení nezvládalo (nízká RAM paměť kamer). Jeden délkový krok např. u posuvové rychlosti 60 mm/min dosahuje 0,1 mm – zanášela by se do vyhodnocení velká chyba. Zároveň MCAE Systems nedisponuje zařízením, které by bylo schopné zachytit tak velký měřicí objem ve 3D prostoru. Byly naměřeny pouze pohybové osy Ar3, Ar4, Ar5, Ar6 – z těchto os by bylo vhodné vyhodnotit pouze osy Ar3 a Ar5, u kterých dochází k větším výchylkám krouticích momentů.

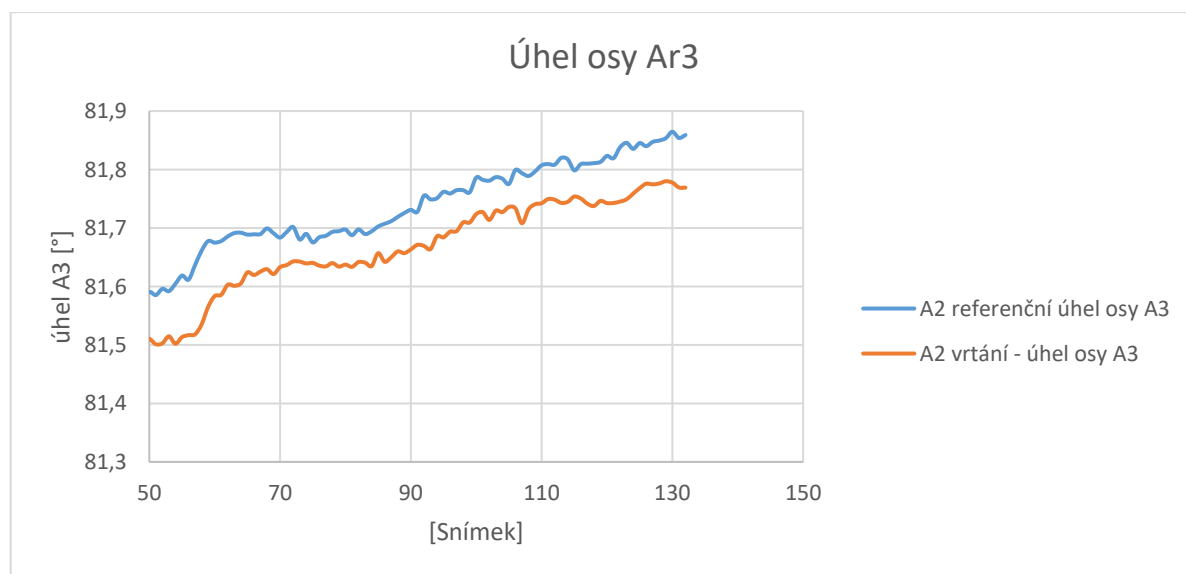
Podarilo se sesouhlasit pouze měření s nižšími posuvovými rychlostmi a to 40 mm/min a 50 mm/min do tolerance 0,02 mm výškové souřadnice vřetene. U těchto dvou vrtání byla provedena kontrola odchylky ve směru vrtání ze systému Pontos 1 vůči systému Pontos 2 – výsledky jsou uvedeny v tabulce:

Tab 9) Odchylka jedné měřené veličiny ze dvou měřících systémů

	A1	A2
Pontos 1 průměrná odchylka Z [mm]	-0,99585	-1,00862
Pontos 2 průměrná odchylka Z [mm]	-1,00924	-1,01853
Odchylka měření [mm]	0,163824	0,141694

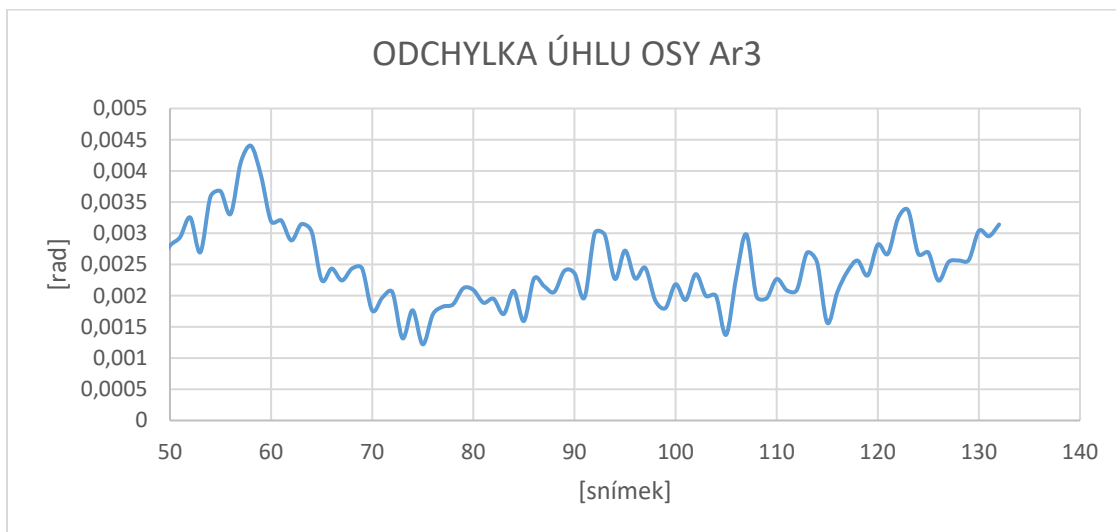
Rozdíl jedné měřené veličiny ze dvou měřících zařízení je 0,163 mm.

Zpracování dat proběhlo v softwaru MS excel. Nejprve byly vyneseny do grafu hodnoty úhlu osy Ar3 a Ar5. V následujícím grafu můžeme vidět průběh úhlu referenčního s průběhem úhlu při vrtání osy A3 při vrtání posuvovou rychlostí 50 mm/min (obr.57).



Obr. 57) Průběh úhlu referenčního a úhlu při zatížení

Následně byla vypočtena odchylka úhlů a vynesena do grafu (obr.58):



Obr. 58) Výchylka úhlu pohybové osy A3

Byly vypočteny průměrné hodnoty odchylek a maximální hodnoty odchylek.

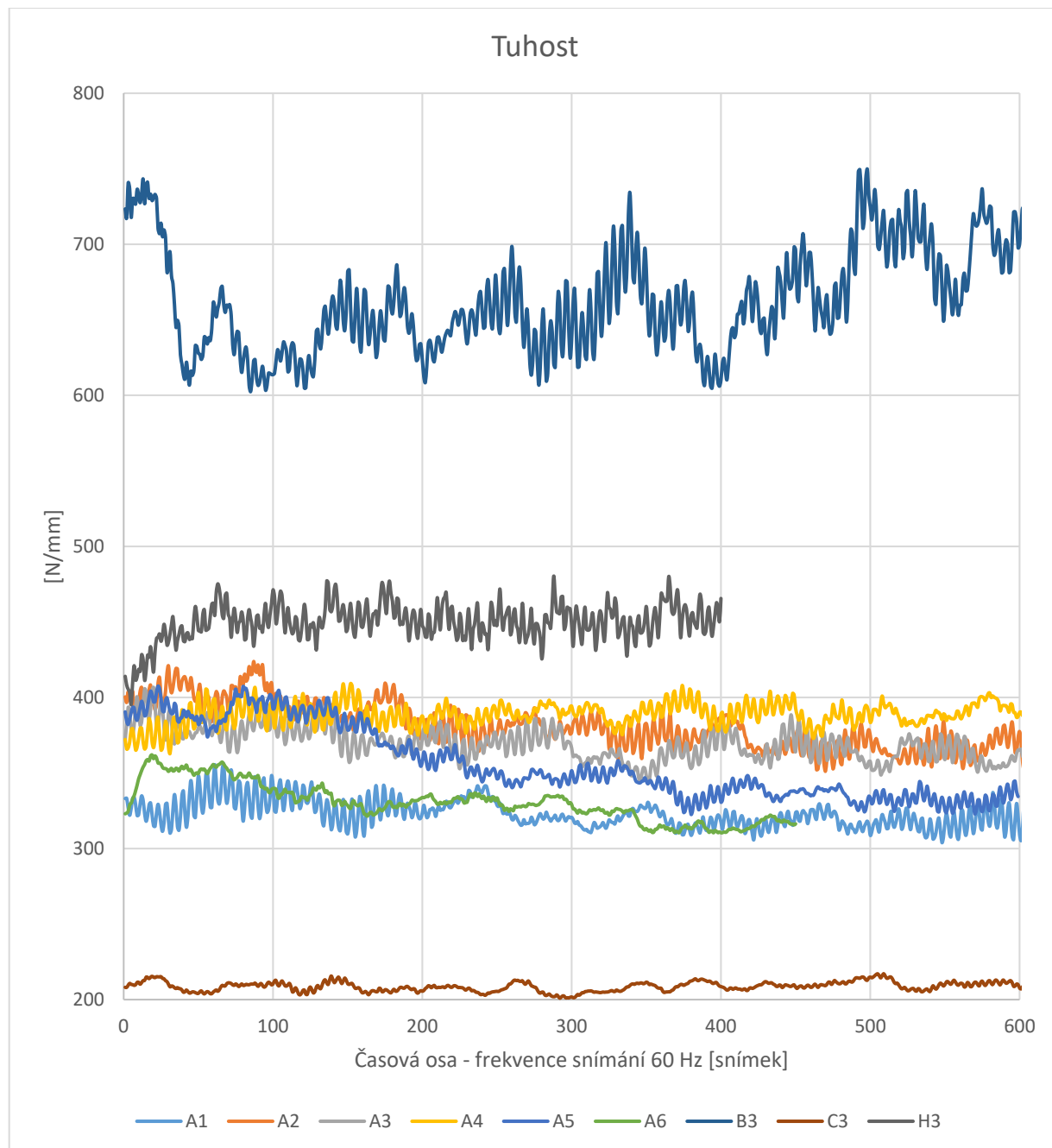
Tab 10) Průměrné a maximální hodnoty odchylek

	RYCHLOST POSUVU 40 mm/min		RYCHLOST POSUVU 50 mm/min	
POHYBOVÁ OSA	Ar3	Ar5	Ar3	Ar5
PRŮMĚRNÁ ODCHYLKA [rad]	0,0003	0,0006	0,0024	0,0017
MAXIMÁLNÍ ODCHYLKA [rad]	0,0016	0,0013	0,0044	0,0048

12 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

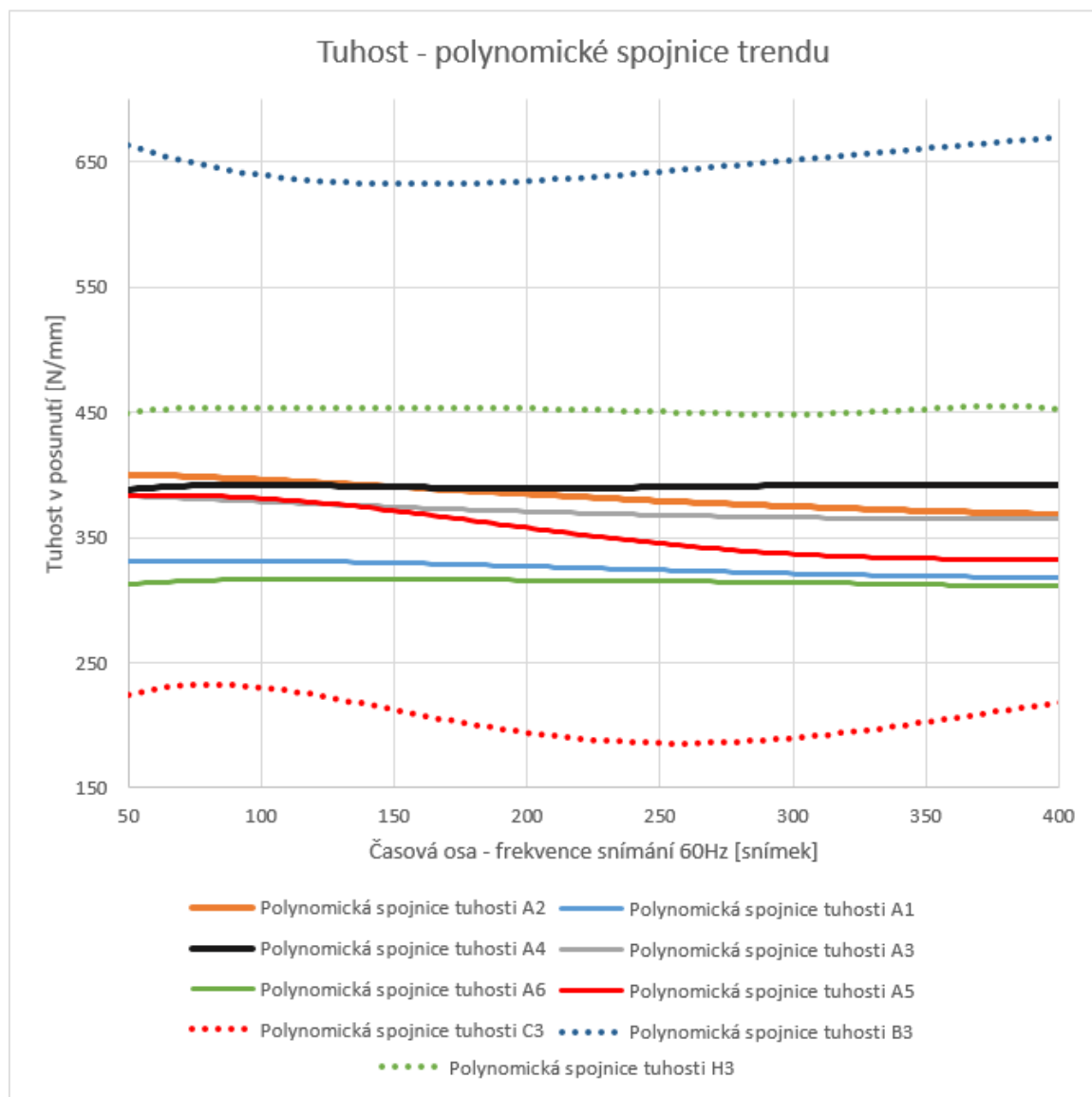
12.1 Vyhodnocení tuhosti

Celková tuhost v posunutí ramene průmyslového robotu při operaci vrtání byla vyhodnocena pomocí vztahu – celková řezná síla / průběh celkové odchylky. V následujícím grafu (obr.59) jsou zobrazeny průběhy tuhosti ramene pro všechny oblasti vrtání všemi posuvovými rychlostmi, které byly naměřeny.



Obr. 59) Průběh tuhosti při rozdílných zatíženích

Značení je popsáno v kapitole 10.3. Pro názornější ukázkou byly vytvořeny polynomicke spojnice trendu (polynom st.6) uvedeny v následujícím grafu (obr.60).



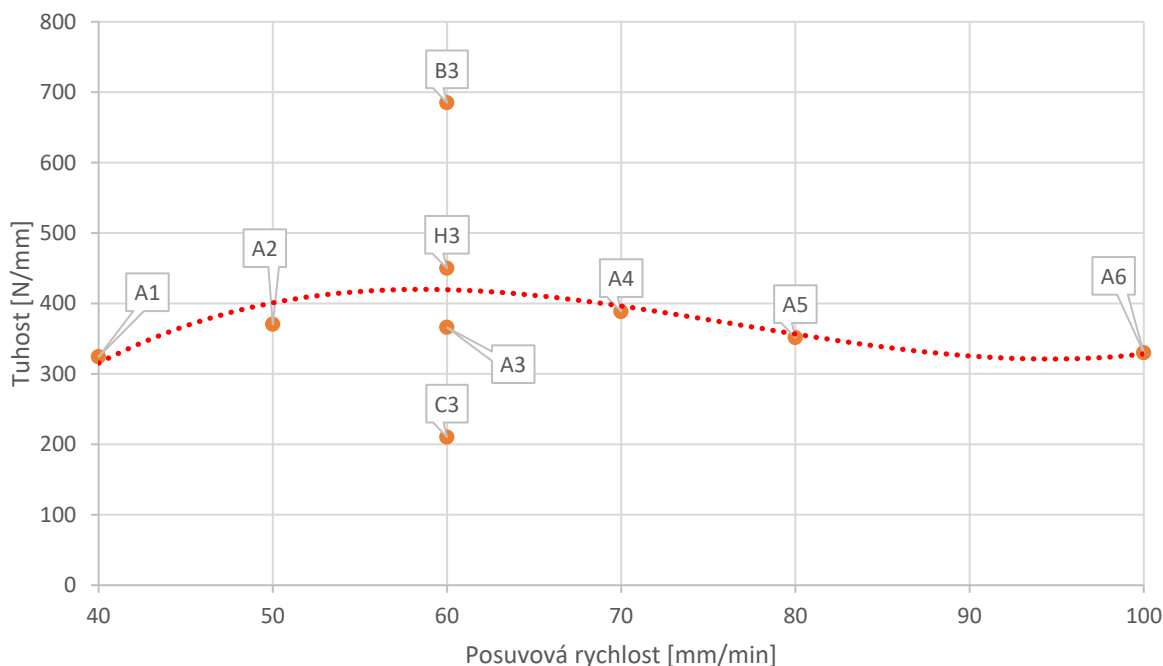
Obr. 60) Polynomicke spojnice trendu tuhosti

Dále byla vypočtena hodnota průměrné tuhosti u všech způsobů vrtání.

Tab 11) Průměrná tuhost v posunutí

Vrtání	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B3	C3	H
Posuvová rychlost [mm/min]	40	50	60	70	80	100	60	60	60
Celková pr. tuhost [N/mm]	324,36	367,62	366,17	389,88	343,32	313,88	688,96	210,19	450,01

Celková průměrná hodnota tuhosti při vrtání



Obr. 61) Průměrné hodnoty tuhostí v posunutí pro jednotlivá vrtání

Na obr. 61 jsou vyneseny průměrné hodnoty tuhostí. Nejvyšší hodnoty tuhosti mělo rameno průmyslového robotu při vrtání B3 – svislé vrtání v blízkosti kořene robotu posuvovou rychlostí 60 mm/min. Naopak nejnižší hodnoty tuhosti mělo vrtání C3 – svislé vrtání u konce dosahu průmyslového robotu (největší pracovní vzdálenost od kořene robotu).

U svislého vrtání v oblasti A (polovina dosahu robotu) můžeme pozorovat nárůst tuhosti až po hodnotu posuvu A4 (70 mm/min) – podle průběhu trendové křivky (v grafu červeně) by se dala předpokládat nejvyšší hodnota tuhosti u vrtání A3 (posuvová rychlost 60 mm/min). Z naměřených hodnot ale vidíme pokles hodnoty tuhosti u vrtání A3. Nejvyšší hodnotu tuhosti při vrtání v oblasti poloviny dosahu robotu tedy robot vykazuje při vrtání posuvovou rychlostí A4. Poté dochází ke snižování hodnoty tuhosti se zvyšující se posuvovou rychlostí, tedy i se zvyšující se celkovou řeznou silou.

Hodnota tuhosti u horizontální vrtání byla vyšší (o 84 N/mm) než u svislého vrtání ve stejném místě stejnou posuvovou rychlostí.

V následující tabulce je uveden výsledek z vyhodnocení tuhosti ze systému Pontos 2, tedy tuhost v natočení jednotlivých kloubů. Pouze pro dvě pohybové osy A3 a A5 pro rychlost posuvu 40 mm/min a 50 mm/min.

	RYCHLOST POSUVU 40 mm/min		RYCHLOST POSUVU 50 mm/min	
	A3	A5	A3	A5
TUHOST [Nm/rad]	1830,68	1079,73	671,51	286,59

Obr. 62) Tuhost v natočení pohybových os Ar3 a Ar5

12.2 Vyhodnocení vibrací

Vyhodnocení vibrací bylo provedeno podle postupu v kapitole 11.2.4. V následující tabulce jsou uvedeny efektivní hodnoty kmitání ve třech osách. Efektivní hodnota představuje asi 70% velikost amplitudy viz kapitola 4.2.

Tab 12) Efektivní hodnoty vibrací v jednotlivých směrech

EFEKTIVNÍ HODNOTA VIBRACÍ V OSÁCH										
OPAKOVÁNÍ	OSY	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B3	C3	H3
1	X [mm]	0,020	0,015	0,015	0,012	0,013	0,001	0,013	0,008	0,010
	Y [mm]	0,015	0,012	0,012	0,006	0,009	0,005	0,006	0,014	0,006
	Z [mm]	0,030	0,022	0,021	0,018	0,020	0,002	0,018	0,017	0,006
2	X [mm]	0,020	0,016	0,016	0,012	0,002	0,006	0,012	0,002	0,010
	Y [mm]	0,013	0,010	0,010	0,003	0,008	0,007	0,006	0,004	0,002
	Z [mm]	0,029	0,022	0,023	0,019	0,003	0,012	0,017	0,003	0,005
3	X [mm]	0,020	0,015	0,016	0,001	0,001	0,002	0,012	0,008	0,011
	Y [mm]	0,012	0,009	0,010	0,003	0,003	0,004	0,005	0,014	0,003
	Z [mm]	0,030	0,024	0,024	0,002	0,001	0,002	0,018	0,017	0,008
4	X [mm]	0,020	0,015	0,016	0,012	0,013	0,001	0,013	0,008	0,011
	Y [mm]	0,012	0,012	0,005	0,004	0,008	0,004	0,006	0,015	0,006
	Z [mm]	0,031	0,022	0,025	0,018	0,020	0,001	0,019	0,017	0,006
5	X [mm]	0,021	0,016	0,016	0,012	0,002	0,001	0,013	0,009	0,016
	Y [mm]	0,013	0,012	0,008	0,004	0,004	0,003	0,003	0,015	0,012
	Z [mm]	0,031	0,025	0,025	0,019	0,002	0,001	0,019	0,017	0,007

V tabulce jsou zobrazeny efektivní hodnoty vibrací pro všechny posuvové rychlosti, oblasti a směry vrtání. Dále můžeme vidět odlehle hodnoty (podbarveny červeně), které byly testovány Deanovým – Dixonovým testem (s pravděpodobností $P = 95\%$) a byly dále vyloučeny.

Tab 13) Výslednice efektivních hodnot

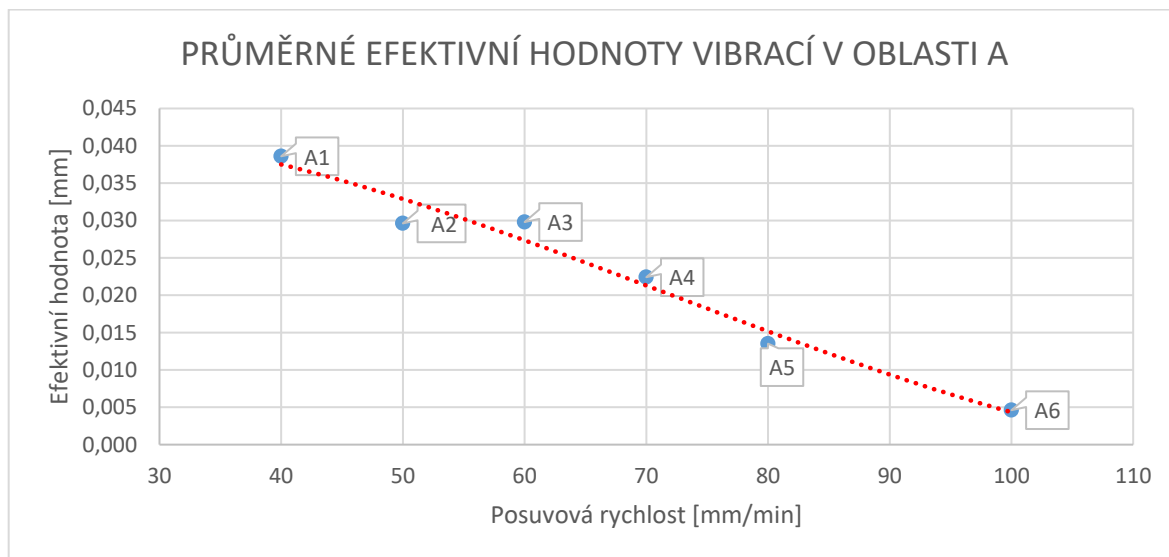
VÝSLEDNICE EFEKTIVNÍ HODNOTY										
OPAKOVÁNÍ	OSY	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B3	C3	H3
1	XYZ [mm]	0,040	0,029	0,028	0,023	0,025	0,006	0,023	0,023	0,013
2	XYZ [mm]	0,037	0,028	0,030	0,022	0,009	0,015	0,022	0,005	0,012
3	XYZ [mm]	0,038	0,030	0,030	0,004	0,004	0,005	0,022	0,023	0,014
4	XYZ [mm]	0,039	0,029	0,030	0,022	0,025	0,004	0,023	0,024	0,014
5	XYZ [mm]	0,040	0,032	0,031	0,023	0,005	0,004	0,023	0,025	0,021

V další tabulce č. 14 jsou uvedeny celkové průměrné efektivní hodnoty.

Tab 14) Průměrná efektivní hodnota

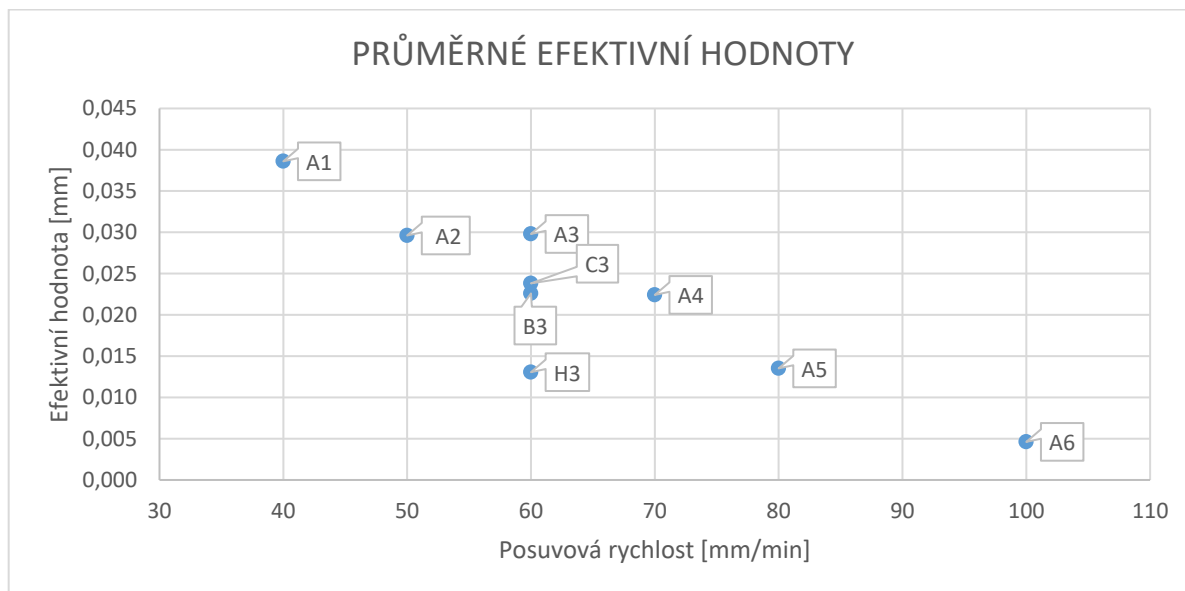
PRŮMĚRNÁ EFEKTIVNÍ HODNOTA										
RYCHLOST POSUVU [mm/min]	40	50	60	70	80	100	60	60	60	
OZNAČENÍ	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B3	C3	H3	
XYZ [mm]	0,039	0,030	0,030	0,022	0,014	0,005	0,023	0,024	0,013	

Tyto hodnoty byly následně vyneseny do grafu (obr.63).



Obr. 63) Hodnoty vibrací svislého vrtání v oblasti A

Můžeme sledovat pokles efektivní hodnoty vibrací s rostoucí posuvovou rychlostí vrtání – s rostoucí posuvovou silou. Pokud je hodnota posuvové síly nízká, dochází k vytvoření kmitavého pohybu vlivem řezného procesu. Tento pohyb (kmitání) se přenáší na vřeteno a dále do průmyslového robotu. S rostoucí posuvovou silou dochází k většímu přitlaku vrtáku na obráběný materiál a vrták nemá tendenci „odskakovat“. Vibrace se více přenáší do pracovního stolu a poté do podlahy.



Obr. 64) Efektivní hodnoty vibrací všech vrtání

V grafu (obr. 64) jsou vyneseny i efektivní hodnoty vibrací vznikajících při vrtání v oblastech B a C svislého směru vrtání a oblasti B horizontálního směru vrtání při posuvové rychlosti 60 mm/min. Tyto hodnoty jsou nižší než vrtání stejnou posuvovou rychlostí.

V nejvzdálenějším místě a nejbližším místě k robotu jsou hodnoty téměř stejné. Nejlepší hodnoty při posuvové rychlosti 60 mm/min dosáhlo horizontální vrtání.

13 OPTIMÁLNÍ VELIKOST POSUVOVÉ SÍLY

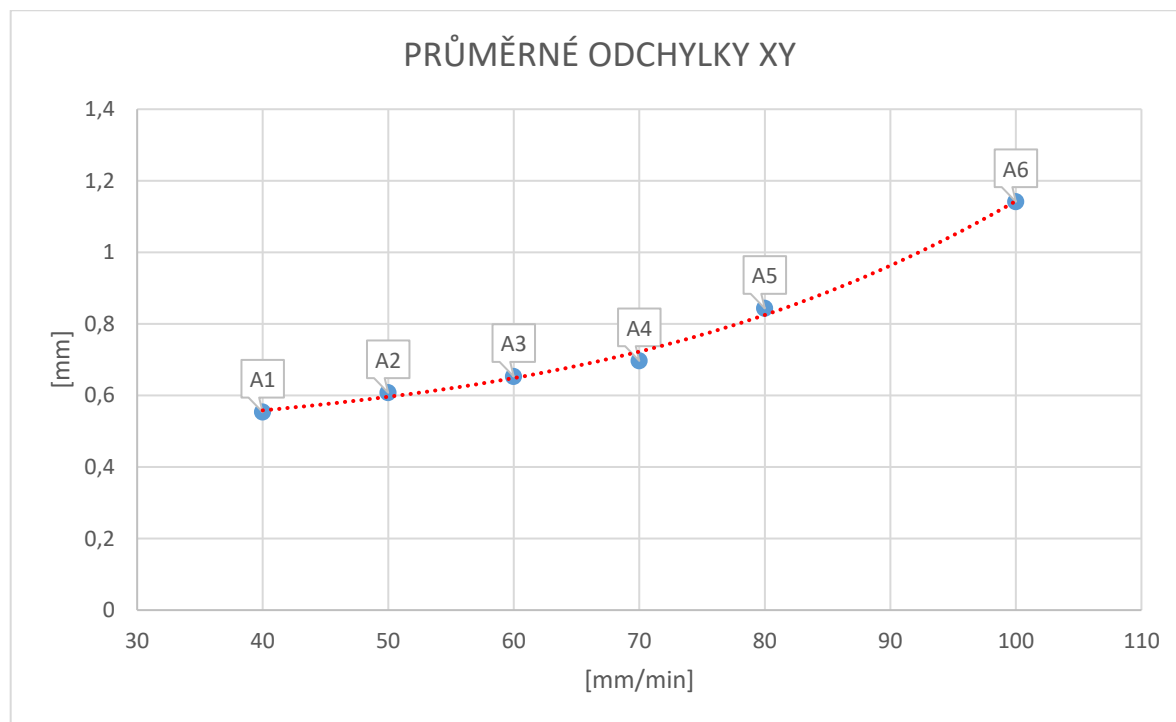
13.1 Kritéria

Pro nalezení optimální velikosti posuvové síly budou použita tato kritéria:

- Přesnost v osách X a Y (Z – osa vrtání) K1
- Tuhost robotu – deformace ramen K2
- Vzniklé vibrace K3
- Čas vrtání K4
- Opotřebení nástroje K5

KRITÉRIUM 1

Pro hodnocení přesnosti vyvrtané díry budeme vycházet z odchylek kolmých na osu vrtání – odchylky ve směrech X a Y. Odchylku ve směru osy vrtání můžeme eliminovat postupným vyvrtáváním otvoru. V následujícím grafu (obr. 65) jsou zobrazené průměrné výslednice odchylek v rovině XY.



Obr. 65) Průměrné odchylky vrtání v rovině kolmé na osu nástroje

Můžeme pozorovat téměř lineární nárůst hodnoty odchylek až po rychlost posuvu 70 mm/min (A4) poté dochází k výraznějšímu nárůstu odchylek. Pro ověření odchylek v jiných oblastech vrtání byla vybrána (po rychlém zhodnocení ve Škodě) rychlost posuvu 60 mm/min (A3).

Odchylky vynesené do grafu a seřazené od nejnižší po nejvyšší. Jedná se o kritérium minimalizační – nejlepší hodnota je ta nejmenší.

Tab 15) Průměrné odchylky vrtání v rovině kolmé na osu nástroje

VRTÁNÍ	RYCHLOST POSUVU [mm/min]	PRŮMĚRNÁ ODCHYLKA [mm]
A1	40	0,553
A2	50	0,607
A3	60	0,653
A4	70	0,697
A5	80	0,843
A6	100	1,141

KRITÉRIUM 2

Druhým nejdůležitějším kritériem je minimální deformace ramen, kterou představuje tuhost. Jedná se o kritérium maximalizační – nejlepší hodnota je ta nejvyšší. Hodnoty jsou v kapitole 12.1.

KRITÉRIUM 3

Dalším kritériem je hodnota vibrací. Jedná se o kritérium minimalizační. Snažíme se o co nejnižší vibrace. Hodnoty jsou v kapitole 12.2.

KRITÉRIUM 4

Minimalizační kritérium, které představuje čas vrtání.

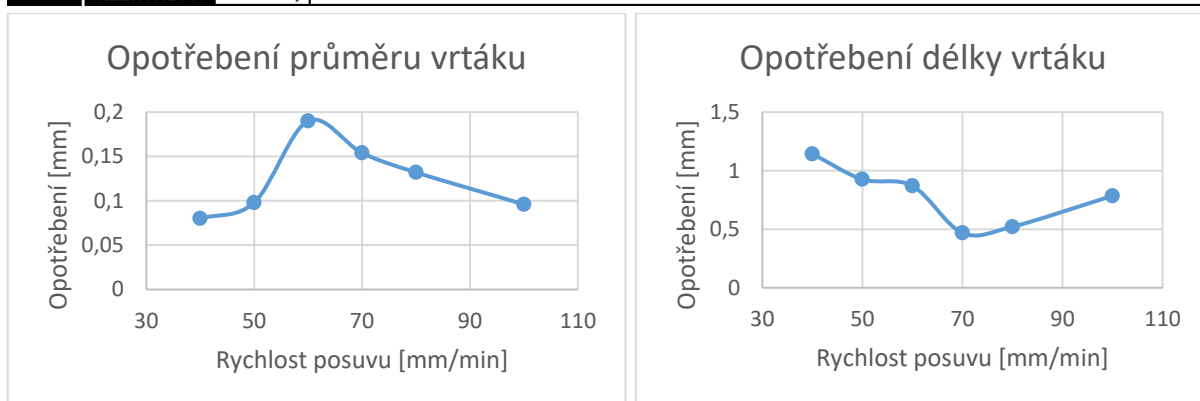
VRTÁNÍ	ČAS VRTÁNÍ [s]
A6	18
A5	22,5
A4	25,714
A3	30
A2	36
A1	45

KRITÉRIUM 5

Kritérium, které představuje opotřebení nástroje. Jedná se o minimalizační kritérium. Pro naměření opotřebení nástroje byl použit měřicí přístroj DMG Moriset. Bylo měřeno opotřebení průměru vrtáku a opotřebení jeho délky. Výsledky jsou v následujících grafech a tabulce.

Tab 16) Opotřebení nástroje (vrtáku)

	opotřebení průměru [mm]	opotřebení délky [mm]
A1	0,08	1,143
A2	0,098	0,926
A3	0,19	0,87
A4	0,154	0,469
A5	0,132	0,521
A6	0,096	0,785



Opotřebení nástroje a) průměr

b) délka

K nalezení optimální rychlosti posuvu v závislosti na opotřebení vrtáku byla použita metoda vícekritériálního hodnocení variant. Opotřebení průměru vrtáku byla přiřazena vyšší váha z důvodu větší závislosti na přesnost vrtaného otvoru. Jednotlivým rychlostem posuvů bylo přiřazeno pořadí podle výsledku hodnocení (zobrazeno v tabulce 17)

Tab 17) Optimální rychlost posuvu v závislosti na opotřebení nástroje

	opotřebení průměru [mm]	opotřebení délky [mm]	Pořadí
A1	0,08	1,143	6
A2	0,098	0,926	4
A3	0,19	0,87	5
A4	0,154	0,469	2
A5	0,132	0,521	1
A6	0,096	0,785	3
Váha	0,666666667	0,333333333	

13.2 Nalezení optimální hodnoty

Byla použita metoda váženého součtu – vhodná pro kvantitativní kritéria. Nejhorším veličinám byla přiřazena hodnota 0 (značení d_j) a nejlepším veličinám hodnota 1 (značení h_j). Pro dílčí užitek u_{ij} hodnoty y_{ij} platí vztah [22][23]:

$$u_{ij} = \frac{y_{ij} - d_j}{h_j - d_j} \quad (47)$$

$i=1,2,\dots,m ; j=1,2,\dots,n$

Budeme vycházet z této tabulky reálných hodnot:

Tab 18) Hodnoty kritérií

	K1	K2	K3	K4	K5
	MIN	MAX	MIN	MIN	MIN
A1	0,553	324,363	0,039	45	6
A2	0,607	370,401	0,030	36	4
A3	0,653	366,168	0,030	30	5
A4	0,697	388,446	0,022	25,714	2
A5	0,843	351,534	0,014	22,5	1
A6	1,141	329,846	0,005	18	3

Jednotlivá kritéria byla seřazena podle důležitosti a byly vypočteny váhy podle pořadí.

Tab 19) Váhy kritérií

	K1	K2	K3	K4	K5
váhy	0,333333	0,266667	0,2	0,133333	0,066667

Pro jednotlivé varianty agregované funkce užitku platí vztah:

$$u(a_i) = \sum_{j=1}^n v_j u_{ij} \quad (48)$$

Dílní užitky a vypočtené varianty agregovaného užitku jsou v tab. 20.

Tab 20) Agregovaný užitek

	K1	K2	K3	K4	K5	AGREGOVANÝ UŽITEK
A1	1	0	0	0	0	0,333
A2	0,908	0,718	0,271	0,333	0,400	0,619
A3	0,830	0,652	0,276	0,556	0,200	0,593
A4	0,756	1	0,488	0,714	0,800	0,765
A5	0,507	0,424	0,750	0,833	1	0,610
A6	0	0,086	1	1	0,600	0,396

Jednotlivé posuvové rychlosti můžeme tedy seřadit od nejlepší po nejhorší podle agregovaného užitku:

$$A4 > A2 > A5 > A3 > A6 > A1$$

Nejlépe tedy vychází posuvová rychlost s označením A4 (70 mm/min), která odpovídá posuvové síle 431 N a celkové řezné síle 549,85 N.

14 ZÁVĚR

V první části diplomové práce byla popsána teorie, týkající se problematiky obrábění průmyslovými roboty se sériovou kinematickou strukturou, byla rozebrána operace vrtání (druhy vrtání, základní vzorce pro výpočet a stanovení spekter a velikostí řezných sil). Dále byla probírána problematika kmitání a byly představeny měřicí systémy, které byly použity pro problémy diplomové práce.

Problém byl zadán společností ŠKODA Auto a.s. a byl řešen s využitím kapacit společnosti MCAE Systems s.r.o. ŠKODA Auto a.s. Snaží se zařadit průmyslové roboty do výrobního procesu větší měrou, než jen jako pomocnou sílu k obsluze dalších strojů. Chce tyto stroje nahradit přímo průmyslovými roboty a výrazně tak zkrátit čas výrobního procesu. Konkrétně v tomto případě šlo o nahrazení konvenčního vrtacího stroje průmyslovým robotem, vybaveným koncovým efektem v podobě vrtacího vřeteníku. Prvním krokem tohoto problému je stanovení tuhosti průmyslového robotu při operaci vrtání při různých zatíženích řeznými silami.

Na základě teorie o plánování technických experimentů, teorie o tuhosti a teorie statistického zkoumání byla vytvořena metoda pro vyhodnocení tuhosti ramene průmyslového robotu. Pomocí optických skenerů byly naměřeny odchylky vedení po dráze průmyslového robotu při různých zatíženích řeznými silami a v různých vzdálenostech od kořene robotu. Rovněž bylo naměřeno a vyhodnoceno vzniklé chvění od řezného procesu při různých zatíženích.

Bylo stanoveno 6 hodnot posuvových rychlostí pro vertikální vrtání v „ideální“ oblasti pracovního prostoru robotu (přibližně polovina dosahu ramene). Těchto 6 hodnot bylo naměřeno a vyhodnoceno pomocí odchylky dráhy vřetene při vrtání od dráhy bez zatížení řeznými silami. Dráha vřetene byla snímána systémem Aramis. Byla nalezena optimální posuvová rychlost, která byla dále ověřena v dalších oblastech pro vrtání (blízkost kořene robotu, u konce pracovního prostoru robotu a horizontální vrtání v polovině dosahu robotu). Byla vypočtena celková řezná síla a díky již známé odchylce byl vypočítán průběh tuhosti v posunutí. Výsledkem tedy byly průběhy tuhostí pro 9 různých podmínek vrtání. Rovněž byla tímto způsobem také zkontrolována přesnost vedení po lineární dráze, která byla splněna dle štitkových údajů robotu.

Souběžně s měřením odchylky vřetene byla druhým optickým skenerem (Pontos) snímána větší část průmyslového robotu. Zároveň byl nahráván záznam průběhu kroutících momentů na jednotlivých pohybových osách průmyslového robotu. Z druhého optického skeneru byly získány odchylky průběhů úhlů jednotlivých částí ramen při vrtání od průběhu úhlů při pohybu bez zatížení. Z těchto dat byly vypočítány hodnoty tuhostí v natočení jednotlivých pohybových os robotu. Nicméně byla zvolena nízká frekvence snímání (z důvodu malé paměti RAM kamer systému Pontos), proto se podařilo vyhodnotit pouze ta měření, která měla nízkou posuvovou rychlost vrtání.

Dále byla pomocí vhodné metody nalezena optimální řezná síla pro svislé vrtání na základě několika kritérií:

- přesnost dráhy ve směrech kolmých na osu vrtání
- tuhost ramene robotu (deformace ramene)

- vzniklé vibrace
- čas vrtání
- opotřebení nástroje

Opotřebení nástroje v závislosti na různých posuvových rychlostech vrtání bylo měřeno přístrojem DMG Microset. Dále byla nalezena optimální hodnota řezných podmínek pro nejmenší opotřebení nástroje.

Odchylka v rovině kolmé na osu vrtání je např. u vrtání s nejnižší řeznou silou 0,55 mm. Dá se tedy předpokládat, že přesnost vyvrtaného otvoru se bude lišit o tuto hodnotu. U tolerance H10 pro díru dle výkresové dokumentace je tato odchylka nepřipustná. Průmyslový robot by tedy spíše našel uplatnění u méně přesných operací nebo by se musely zvolit řezné podmínky, u kterých by vznikaly menší řezné síly. Zde by našel uplatnění systém Force Control, který hlídá vzniklé řezné síly. Pokud by došlo k překročení určité výše řezné síly, došlo by k automatickému snížení např. posuvové rychlosti, a tím ke snížení řezných sil. Toto by mělo za následek zvýšení přesnosti obrábění robotem. Díky naměřeným velikostem odchylek a vypočtené tuhosti při různých řezných silách a různých oblastí obrábění, by bylo vhodné vytvořit optimalizovaný program robotu pro obrábění s využitím systému Force Control. Tento postup je vhodný i pro použití u dalších obráběcích operací.

Postup měření se systémem Pontos, který snímá odchylky úhlů ramen, by našel uplatnění při identifikaci opotřebovaných pohybových os u déle používaných robotů.

Jako pokračování řešení tohoto problému bych navrhoval tvorbu programu pro optimalizované obrábění se systémem Force Control s využitím výsledků této práce.

15 SEZNAM POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ A SOFTWARE

1) ARAMIS System

Delivery Date 29.03.2012

External Controller

TYPE: Sensor Controller

SN: 80001500460

Computer

TYPE: Dual HexaCore Xeon (19")

SN: 13199296269862012031600000001404

Processor

TYPE: Intel XEON Hexa Core X5690 (3.46 GHz)

Graphic Interface Card

TYPE: Quadro 4000 (2048 MB)

SN: P1031SM032521000HL

Memory

TYPE: PC1333 ECC (4GB)

RAMSIZE: 36GB

Camera

TYPE: Dalsa 4M60SA CL

SN: 12020886

Camera

TYPE: Dalsa 4M60SA CL

SN: 12021983

Camera Lens

TYPE: Schneider 28mm

SN: 14990807

Camera Lens

TYPE: Schneider 28mm

SN: 14990964

Calibration Object

Memory

TYPE: PC333 ECC (2GB)

RAMSIZE: 16GB

Graphic Interface Card

TYPE: Quadro FX 1100 (128 MB)

SN: P192CM0193040003V

TYPE: CC30/MV500x500

SN: CC30/500/D10244

2) Pontos system

Delivery Date 08.08.2007

Camera Lens

TYPE: Titanar 20mm

SN: 3838

Camera Lens

TYPE: Titanar 20mm

SN: 3848

Calibration Object

TYPE: C1700

SN: CG054

PONTOS Sensor

TYPE: PONTOS HS Rev.01

Camera

TYPE: Basler A504K

SN: 20613728

Camera

TYPE: Basler A504K

SN: 20707568

Computer

TYPE: Dual Opteron (19")

SN: 506326GOM12072005120600000001123

Operating system

TYPE: GOM Linux 7.0

Processor

TYPE: AMDOpteron

3) Tritop

Delivery Date 18.12.2009

Camera

TYPE: Canon EOS 1Ds Mark III

SN: 635156

Carbon Fiber Scale Bar

LENGTH: 2000 mm

SN: SZ0468

Carbon Fiber Scale Bar

LENGTH: 2000 mm

SN: SZ0468

4) Capsule Computer

Delivery Date 02.12.2016

Processor

TYPE: 2x Intel XEON E52687W

v3 (3.1 GHz)

Graphic Interface Card

TYPE: Quadro K4200 (4096 MB)

Memory

TYPE: DDR4 (16GB)

RAMSIZE: 128GB

OSA250 (2.4 GHz)

4) Software

Aramis Professional 2016

Tritop Professional 2016

MS excel 2016

ABB Test signal viewer Version 1.6

Walter machining calculator version 4.0.2

Sigview 3.0.2.0 Dmg linear

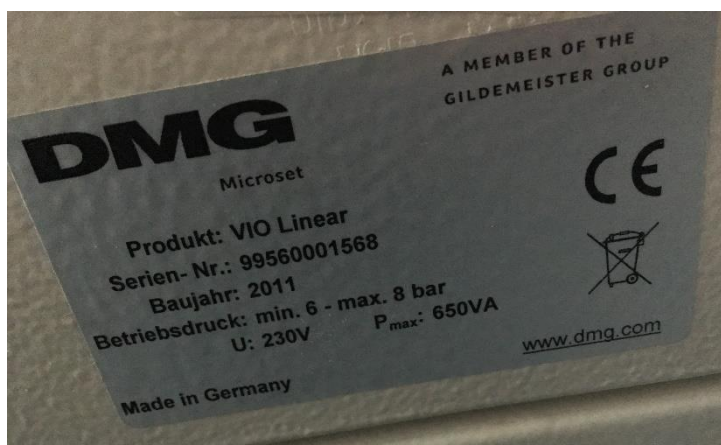
5) Kuka KR60 HA



6) ABB IRB 6700-150



7) DMG Microset VIO 20150 Linear



8) Vřeteno PDS

PDS
Made in Germany
info@pds-gmbh.de
www.pds-gmbh.de

PDS - GmbH
Tichelbrink 68
D-32584 Löhne

MADE IN GERMANY

V	380	380	380	380
Hz	400	500	600	800
1/min	12.000	15.000	18.000	24.000
kW	7,5	7,5	7,5	6
A	16	16	16	13
Pole	4	4	4	4
cos φ	0,81	0,81	0,81	0,81
S/N	1607001G		IP	54
Typ	DLC 120		Zchg.	820-120-C010

16 SEZNAM ZKRATEK A FYZIKÁLNÍCH ZNAČEK

D	průměr díry/nástroje	[mm]
L	délka díry/nástroje	[mm]
v_c	řezná rychlost	[m/min]
v_f	posuvová rychlost	[mm/min]
v_e	rychlost řezného pohybu	[m/min]
n	otáčky nástroje	[min ⁻¹]
f	posuv nástroje na jednu otáčku	[mm/ot]
f_z	posuv nástroje na zub	[mm/ot]
z	počet zubů (břitů) nástroje	[-]
A_d	průřez třísky	[mm ²]
b_d	jmenovitá šířka třísky	[mm]
h_d	jmenovitá tloušťka třísky	[mm]
a_p	šířka záběru ostří	[mm]
κ_r	úhel sklonu ostří	
Ω	vlastní kruhová frekvence kmitání	[rad/s]
x_a	amplituda harmonického kmitání	[m]
φ	počáteční fázový úhel	[rad]
F	frekvence	[Hz]
T	perioda kmitu	[s]
x_{ef}	RMS efektivní hodnota kmitání	[mm]
$x_{stř}$	střední hodnota kmitání	[mm]
$x_{šp-šp}$	rozkmít	[mm]
F_f	posuvová síla	[N]
F_c	řezná síla	[N]
F_f	pasivní síla	[N]
C_{Fc}	konstanta, vyjadřující zejména vliv obráběného materiálu	[-]
x_{FC}	exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku,	[-]
y_{FC}	exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.	[-]
E, G	Youngův Modul	[Pa]
S	příčný průřez	[mm ²]
J_Z, J_P	osový moment a polární kvadratický moment	[mm ⁴]
C_p	tuhost v posunutí	[N/mm]
C_n	tuhost v natočení	[Nm/rad]
C_k	tuhost v krutu	[Nm/rad]
R	variační rozpětí	[mm]
Q	testovací kritérium	[-]

x_e	zkoumaná extrémní odlehlá hodnota	[mm]
x_s	hodnota s x_e sousedící při uspořádání podle velikosti	[mm]
P	pravděpodobnost	[%]
\bar{x}	aritmetický průměr	
s^2	rozptyl	
s	směrodatná odchylka	
r_a	polohový bivektor	[mm]
x	souřadnice v prostoru	[mm]
y	souřadnice v prostoru	[mm]
z	souřadnice v prostoru	[mm]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
HB	tvrdost podle Brinnela	[-]
A	oblast v polovině dosahu robotu	
B	oblast v blízkosti kořene robotu	
C	oblast na konci dosahu robotu	
H	oblast horizontálního vrtání v polovině dosahu robotu	
D_x	odchylka ve směru x	[mm]
D_y	odchylka ve směru y	[mm]
D_z	odchylka ve směru z	[mm]
D_n	celková odchylka	[mm]
M_1-M_6	kroučící moment na pohybové ose 1-6 robotu	[Nm]
$v_{f1} - v_{f6}$	posuvová rychlost 1-6	[mm/min]
α	odchylka úhlu pohybové osy	[rad]
A1-A6	svislé vrtání posuvovou rychlostí $v_{f1}-v_{f6}$ v polovině dosahu robotu	
B3	svislé vrtání posuvovou rychlostí v_{f3} v blízkosti kořene robotu	
C3	svislé vrtání posuvovou rychlostí v_{f3} u konce dosahu robotu	
H3	horizontální vrtání posuvovou rychlostí v_{f3} v polovině dosahu robotu	
A11	první opakování svislého vrtání posuvovou rychlostí $v_{f1}-v_{f6}$ v polovině dosahu robotu	
d_j	nejhorší hodnota	
h_j	nejlepší hodnota	
Ar1-Ar6	Pohybové osy robotu	

17 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] 3D Digitální technologie. *MCAE Systems*. [online]. 9.1.2017 [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/>
- [2] Škoda Auto. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001- [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_Auto
- [3] HAVEL, Ivan M. *Robotika: úvod do teorie kognitivních robotů*. Praha: SNTL, 1980, 279, [1] s.
- [4] ABB Group. *Industrial Robots – IRB 6700*. [online]. 3.11.2016 [cit. 2016-11-03]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6700/irb-6700-data>
- [5] Kolíbal Z., a kolektiv. (2016): *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Nakladatelství VUTIUM Brno. ISBN 978-80214-4828-5.
- [6] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: Technologie obrábění - 1. část, studijní opory pro magisterskou formu studia*. Brno, 2003. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [7] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: Technologie obrábění - 2. část, studijní opory pro magisterskou formu studia*. Brno, 2004. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [8] FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [9] Moldovan, V., Chiriță, V., *Exploatarea rațională a mașinilor de forjat*, Editura Tehnică, București, 1979.
- [10] RUMÍŠEK, P.: *Automatizace (Roboty a manipulátory)*, Brno, 2003. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [11] M. Gautier, A. Jubien, A. Janot, and P.-P. Robet, “Dynamic identification of flexible joint manipulators with an efficient closed loop output error method based on motor torque output data,” in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013, pp. 2949–2955.
- [12] D. S. Milutinovic, B. M. Kokotovic, M. M. Glavonjic, S. T. Zivanovic, and K. F. Ehmann, “Cartesian compliance identification and analysis of an articulated machining robot,” *FME Transactions*, vol. 41, pp. 83–95, 2013.
- [13] C. Gong, J. Yuan, and J. Ni, “Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, no. 14, pp. 2119–2137, 2000.
- [14] Claire Dumas, St_ephane Caro, S_ebastien Garnier, Beno^_t Furet. *Joint Sti_ness Identi_cation of Six-revolute Industrial Serial Robots*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, 2011, 27 (4), pp.881-888. <10.1016/j.rcim.2011.02.003>. <hal-00632989>
- [15] MISÁK, Petr. *Statistické hodnocení výsledků zkoušek* [online]., 14 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.sz.k.fce.vutbr.cz/vyuka/CI57/statistika.pdf>
- [16] Dvořák P. *Základy statistického vyhodnocování výsledků*. Brno: FVHE VFU 2012; 27.
- [17] JANÍČEK P. *Technický experiment*. Brno: VUT Brno, 1989. ISBN 80-214-1230-5
- [18] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. 3., dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3380-9.

- [19] CHLUPÁČ, Petr. *Problematika technologičnosti konstrukce a výroby velkých odlitků raznic* [online]., 1-22 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/history/2007/sbornik/Papers/S2/Chupac_Petr_12123.pdf
- [20] MGR. ING. ALENA BILOŠOVÁ, PH.D., Dr. Ing. Jan Biloš. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika* [online]. 2012 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>
- [21] DynaLOC Series. *PDS, PRECISION DRIVE SYSTEMS* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.pdsspindeln.de/en/automatic-tool-change/dynaloc-series#product-range>
- [22] Pišková V., Vícekriteriální hodnocení I. – příručka pro uživatele, Výzkumný ústav výstavby a architektury v knihovně ministerstva hospodářství ČR, Praha, 1993 Ramík, J.
- [23] Vícekriteriální rozhodování - analytický hierarchický proces (AHP), Slezská univerzita v Opavě, Karviná, 1999, ISBN 80-7248-047-2

18 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

18.1 Seznam tabulek

TAB 1) PARAMETRY ROBOTU IRB 6700-150 [4].....	20
TAB 2) PARAMETRY KUKA KR 60 HA	22
TAB 3) PARAMETRY PONTOS [1]	31
TAB 4) PARAMETRY ARAMIS	33
TAB 5) TABULKA HODNOT QT	41
TAB 6) ŘEZNÉ PODMÍNKY	54
TAB 7) PODMÍNKY PŘÍPRAVNÉHO MĚŘENÍ	63
TAB 8) VÝCHYLKA KROUTÍCÍCH MOMENTŮ PŘI VRTÁNÍ.....	80
TAB 9) ODCHYLKA JEDNÉ MĚŘENÉ VELIČINY ZE DVOU MĚŘÍCÍCH SYSTÉMŮ.....	81
TAB 10) PRŮMĚRNÉ A MAXIMÁLNÍ HODNOTY ODCHYLEK	82
TAB 11) PRŮMĚRNÁ TUHOST V POSUNUTÍ.....	84
TAB 12) EFEKTIVNÍ HODNOTY VIBRACÍ V JEDNOTLIVÝCH SMĚRECH	86
TAB 13) VÝSLEDNICE EFEKTIVNÍCH HODNOT.....	86
TAB 14) PRŮMĚRNÁ EFEKTIVNÍ HODNOTA.....	86
TAB 15) PRŮMĚRNÉ ODCHYLKY VRTÁNÍ V ROVINĚ KOLMÉ NA OSU NÁSTROJE.....	89
TAB 16) OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE (VRTÁKU)	90
TAB 17) OPTIMÁLNÍ RYCHLOST POSUVU V ZÁVISLOSTI NA OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE	91
TAB 18) HODNOTY KRITÉRIÍ.....	92
TAB 19) VÁHY KRITÉRIÍ	92
TAB 20) AGREGOVANÝ UŽITEK	92

18.2 Seznam obrázků

OBR. 1) MCAE SYSTEMS NA MEZINÁRODNÍM STROJÍRENSKÉM VELETRHU V BRNĚ 2016.....	17
OBR. 2) LOGO ŠKODA AUTO [2].....	18
OBR. 3) ROBOT ABB IRB 6700-150 [4]	20
OBR. 4) PRACOVNÍ PROSTOR ROBOTU IRB 6700-150 [4].....	21
OBR. 5) VRTACÍ JEDNOTKA PDS GMBH [21]	21
OBR. 6) PRACOVNÍ PROSTOR ROBOTU KUKA KR60	22
OBR. 7) PRŮŘEZ TRÍSKY PŘI VRTÁNÍ DVOUBŘITÝM VRTÁKEM [6]	24

OBR. 8) VELIČINY POPISUJÍCÍ HARMONICKÝ POHYB [19]	26
OBR. 9) A) SLOŽKY VÝSLEDNÉ SÍLY PŘI OBRÁBĚNÍ [8] B) SLOŽKY SIL NA ŠROUBOVITÉM VRTÁKU [8]	27
OBR. 10) A) PONTOS [1] B) PONTOS, STATIV, POČÍTAČ [1].....	29
OBR. 11) A) MĚŘENÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY [1] B) CRASH-TEST[1]	30
OBR. 12) MĚŘENÍ NA TVÁŘECÍM STROJI SYSTÉMEM PONTOS [1]	30
OBR. 13) KÓDOVANÉ MĚŘÍCÍ BODY	32
OBR. 14) SAMOLEPÍCÍ NEKÓDOVANÉ BODY A JEJICH APLIKACE.....	32
OBR. 15) OBR. NATOČENÍ KAMER.....	33
OBR. 16) KALIBRAČNÍ KŘÍŽ	33
OBR. 17) SYSTÉM ARAMIS.....	34
OBR. 18) POSTUP SNÍMÁNÍ OBJEKTU.....	34
OBR. 19) SESTAVA TRITOP.....	35
OBR. 20) DMG MICROSET VIO 20150 LINEAR.....	35
OBR. 21) KINEMATICKÉ SCHÉMA ŠESTIOSÉHO ROBOTU	38
OBR. 22) ZÁKLADNÍ STRUKTURA EXPERIMENTU ZAČLENĚNÁ DO KOMPLEXNÍ STRUKTURY ŘEŠENÍ PROBLÉMU [17].....	47
OBR. 23) OBR. KOMPLEXNÍ ZOBECNĚNÁ STRUKTURA EXPERIMENTU [17] 48	
OBR. 24) KINEMATICKÉ VELIČINY.....	49
OBR. 25) UPNUTÍ OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU	53
OBR. 26) ROZMĚRY VRTÁKU	54
OBR. 27) SOFTWARE WALTER MACHINING CALCULATOR.....	55
OBR. 28) OBLAST VRTÁNÍ B.....	56
OBR. 29) OBLAST VRTÁNÍ A	56
OBR. 30) OBLAST VRTÁNÍ C	57
OBR. 31) OBLAST VRTÁNÍ	57
OBR. 32) JEDNOTLIVÁ MĚŘENÍ.....	59
OBR. 33) ROZMÍSTĚNÍ MĚŘÍCÍCH BODŮ NA ROBOTU ABB	60
OBR. 34) CELKOVÁ TUHOST	61
OBR. 35) VYHODNOCENÍ TUHOSTI KLOUBŮ	62
OBR. 36) ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA PRACOVISTĚ	63
OBR. 37) ODCHYLKY TRAJEKTORIE VŘETENE U PŘÍPRAVNÉHO MĚŘENÍ 64	
OBR. 38) PŘÍPRAVNÉ MĚŘENÍ V PROSTORÁCH MCAE SYSTEMS	64
OBR. 39) KALIBRACE SYSTÉMŮ NA KŘÍŽE	66

OBR. 40) MĚŘÍCÍ SYSTÉMY A PRŮMYSLOVÝ ROBOT ABB.....	67
OBR. 41) VYVRTANÁ DÍRA.....	68
OBR. 42) USTAVENÍ V POZICI B	69
OBR. 43) IMPORTOVANÝ ELEMENT USTAVENÍ A S DANÝM SOUŘADNÝM SYSTÉMEM A AKTUÁLNÍ ELEMENT USTAVENÍ SVÁZANÝ S IMPORTOVANÝM ELEMENTEM	70
OBR. 44) VYTVOŘENÍ SOUŘADNÉHO SYSTÉMU PRO HORIZONTÁLNÍ VRTÁNÍ71	
OBR. 45) ZOBRAZENÁ POZICE BODU NA VŘETENÍ	72
OBR. 46) NÁHLED SKRIPTU.....	73
OBR. 47) DRÁHA VRTÁNÍ A21	74
OBR. 48) ODCHYLKA TRAJEKTORIE VŘETENE PŘI VRTÁNÍ VE SMĚRU X74	
OBR. 49) A) ODCHYLKA V OSE Y B) ODCHYLKA V OSE Z.....	75
OBR. 50) ODCHYLKA V OSE X S HRANICEMI PRAVDĚPODOBNOTI.....	75
OBR. 51) DRÁHA VRTÁNÍ A21 PROLOŽENÁ KŘIVKOU SMOOTHED SPLINE 76	
OBR. 52) DRÁHA VRTÁNÍ A31 PROLOŽENÁ KŘIVKOU SMOOTHED SPLINE 76	
OBR. 53) VZNIKLÉ VIBRACE PŘI VRTÁNÍ A31	77
OBR. 54) UKÁZKA ZE SOFTWARE SIGVIEW.....	77
OBR. 55) UKÁZKA Z VYHODNOCENÍ PONTOS 2	79
OBR. 56) APLIKACE ABB TEST SIGNAL VIEWER – KROUTÍCÍ MOMENTY Z VRTÁNÍ A61.....	80
OBR. 57) PRŮBĚH ÚHLU REFERENČNÍHO A ÚHLU PŘI ZATÍŽENÍ.....	81
OBR. 58) VÝCHYLKA ÚHLU POHYBOVÉ OSY A3.....	82
OBR. 59) PRŮBĚH TUHOSTI PŘI ROZDÍLNÝCH ZATÍŽENÍCH.....	83
OBR. 60) POLYNOMICKÉ SPOJNICE TRENDU TUHOSTI.....	84
OBR. 61) PRŮMĚRNÉ HODNOTY TUHOSTÍ V POSUNUTÍ PRO JEDNOTLIVÁ VRTÁNÍ 85	
OBR. 62) TUHOST V NATOČENÍ POHYBOVÝCH OS AR3 A AR5.....	85
OBR. 63) HODNOTY VIBRACÍ SVISLÉHO VRTÁNÍ V OBLASTI A.....	87
OBR. 64) EFEKTIVNÍ HODNOTY VIBRACÍ VŠECH VRTÁNÍ.....	87
OBR. 65) PRŮMĚRNÉ ODCHYLKY VRTÁNÍ V ROVINĚ KOLMÉ NA OSU NÁSTROJE.....	89
OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE A) PRŮMĚR B) DÉLKA.....	91

19 SEZNAM PŘÍLOH

1. PŘÍLOHA - POUŽITÉ VZORCE PRO VRTÁNÍ

2. PŘÍLOHA - ODCHYLKY SVISLÉHO VRTÁNÍ – PONTOS 1

DVD

- Elektronická forma diplomové práce
- Pontos 1.xlsx – Příloha č.2
- Pontos 2.xlsx – Příloha č.3
- Vibrace.xlsx – Příloha č.4
- aramis-hw-adjust-tables-en – (konfigurace senzoru) – Příloha č.5
- Záznamy momentů – příloha č.6
- Nastroje-opotrebeni.xlsx – příloha č.7
- Fotografie z měření

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 – POUŽITÉ VZORCE PRO VRTÁNÍ

Vzorce pro výpočty: vrtání

Otáčky

$$n = \frac{v_c \times 1000}{D_c \times \pi} \quad [\text{min}^{-1}]$$

Řezná rychlost

$$v_c = \frac{D_c \times \pi \times n}{1000} \quad [\text{m/min}]$$

Posuv na otáčku

$$f = f_z \times z \quad [\text{mm}]$$

Rychlost posuvu

$$v_f = f \times n \quad [\text{mm/min}]$$

Objem materiálu za jednotku času (vrtání do plna)

$$Q = \frac{v_f \times \pi \times D_c^2}{4 \times 1000} \quad [\text{cm}^3/\text{min}]$$

Příkon

$$P_{\text{mot}} = \frac{Q \times k_c}{60000 \times \eta} \quad [\text{kW}]$$

Krouticí moment

$$M_c = \frac{D_c^2 \times k_c \times f}{8000} = \frac{P_c \times 9500}{n} \quad [\text{Nm}]$$

Posuvná síla

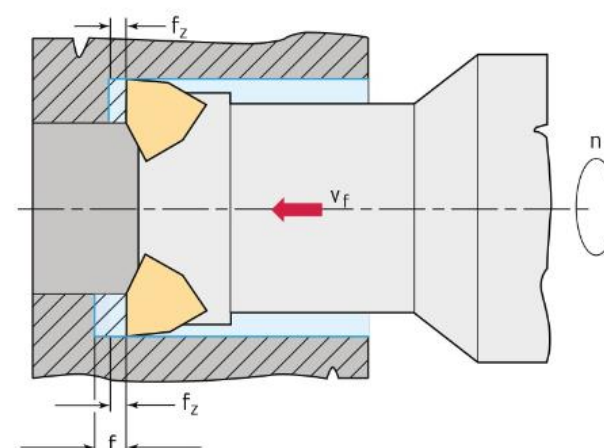
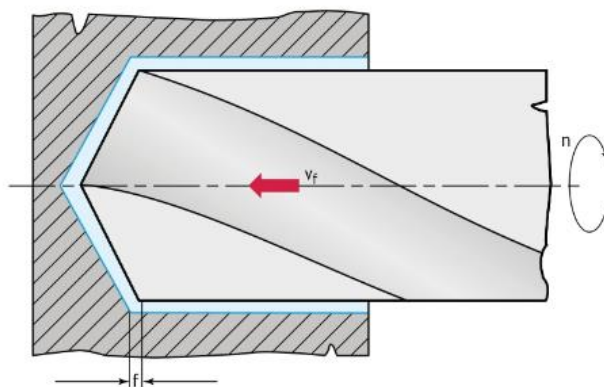
$$F_f = 0,63 \times \frac{f \times D_c \times k_c}{2} \quad [\text{N}]$$

Specifická řezná síla

$$k_c = \frac{k_{c1,1}}{h^{m_c}}$$

Tloušťka třísky

$$h = f_z \times \sin \kappa \quad [\text{mm}]$$



n	otáčky	min ⁻¹
D _c	průměr	řezání mm
z	počet zubů	
v _c	řezná rychlost	m/min
v _f	rychlost posuvu	mm/min
f _z	posuv na zub	mm
f	posuv za otáčku	mm
A	průřez třísky	mm ²
Q	objem materiálu za jednotku času	cm ³ /min
P _{mot}	příkon	kW
M _c	točivý moment	Nm
F _f	posuvná síla	N
h	tloušťka třísky	mm
k _c	specifická řezná síla	N/mm ²
η	účinnost stroje (0,7–0,95)	
κ	úhel nastavení	°
k _{c1,1} *	specifická řezná síla pro 1 mm ² průřezu třísky při h = 1 mm	N/mm ²
m _c *	nárůst křivky k _c	

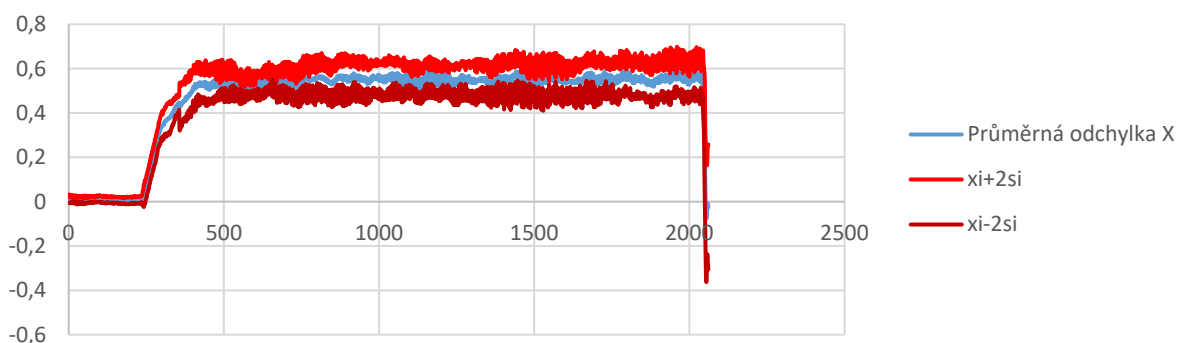
*m_c a k_{c1,1} viz tabulka na straně H 7



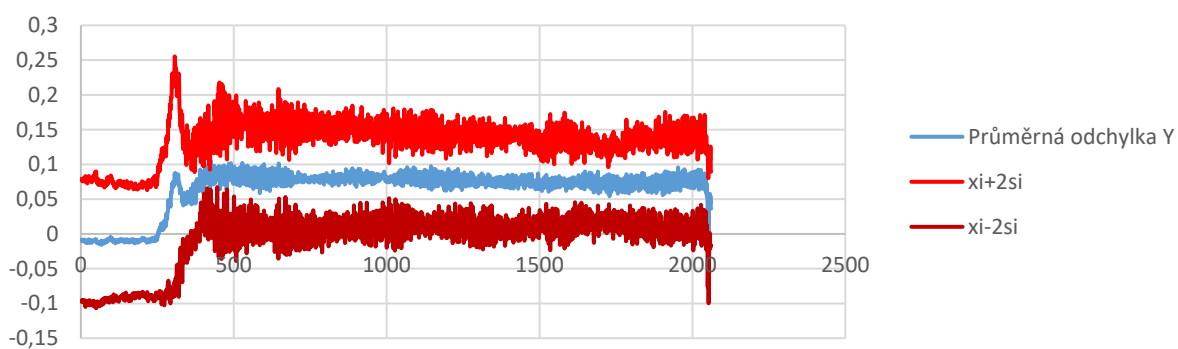
PŘÍLOHA 2 – ODCHYLKY SVISLÉHO VRTÁNÍ – PONTOS 1

+ Pontos 1.xlsx

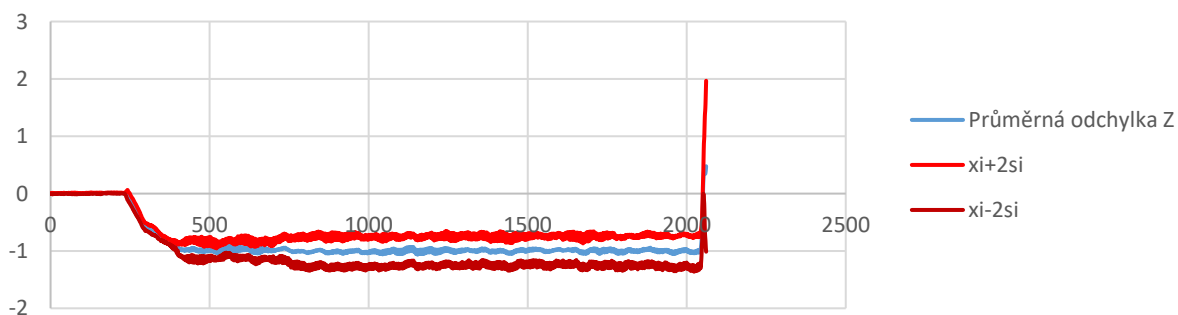
A1 Průměrná odchylka X + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



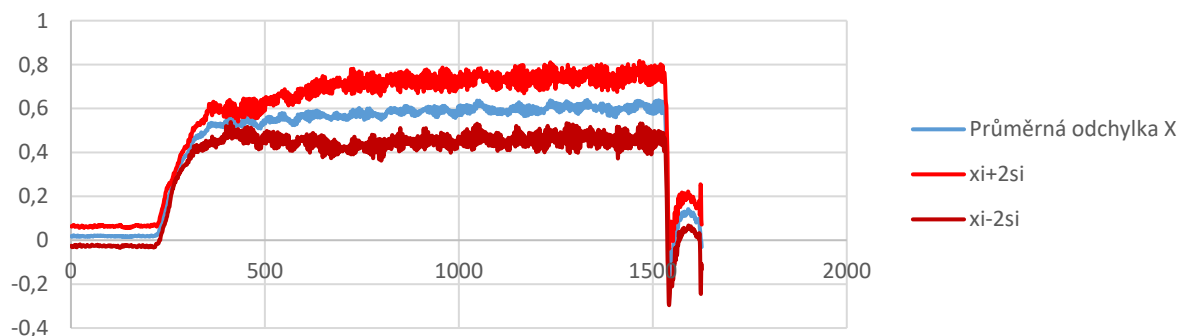
A1 Průměrná odchylka Y + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



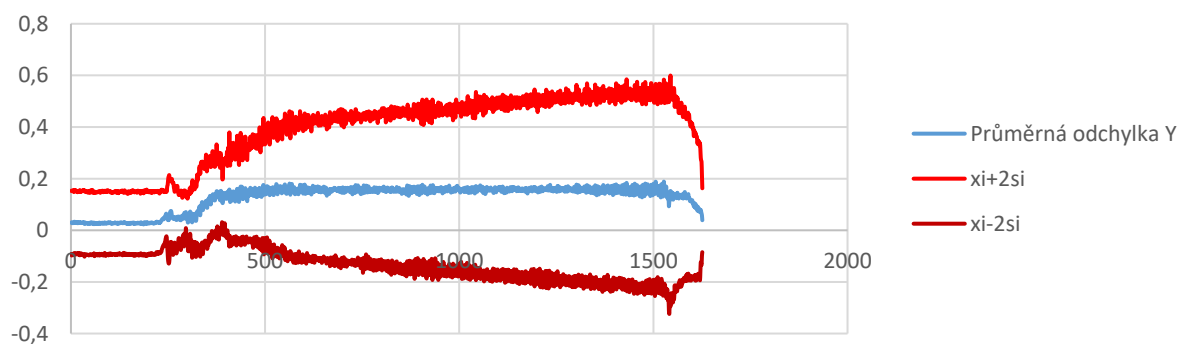
A1 Průměrná odchylka Z + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



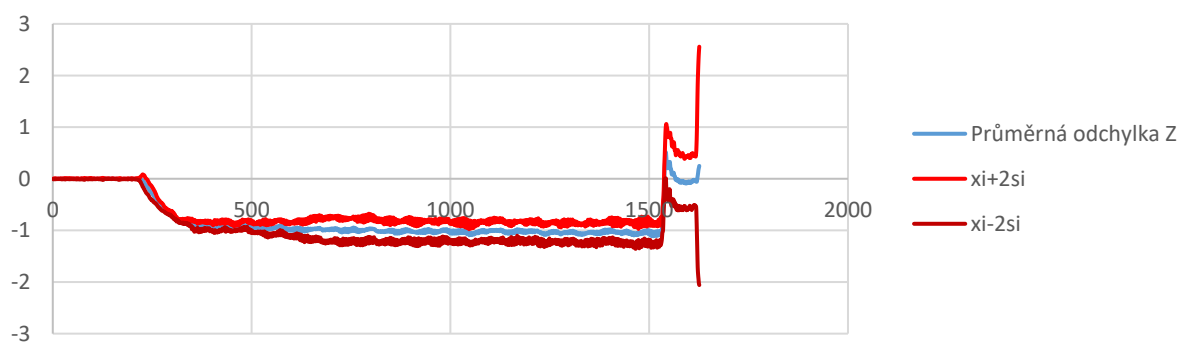
A2 Průměrná odchylka X + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



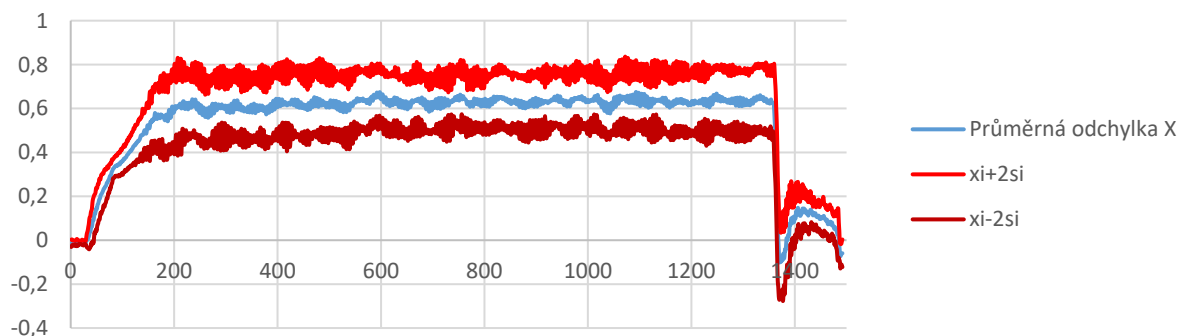
A2 Průměrná odchylka Y + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



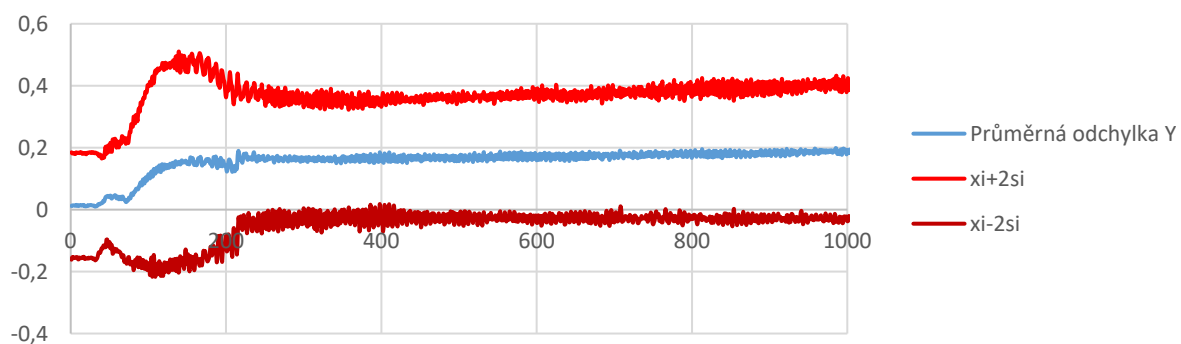
A2 Průměrná odchylka Z + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



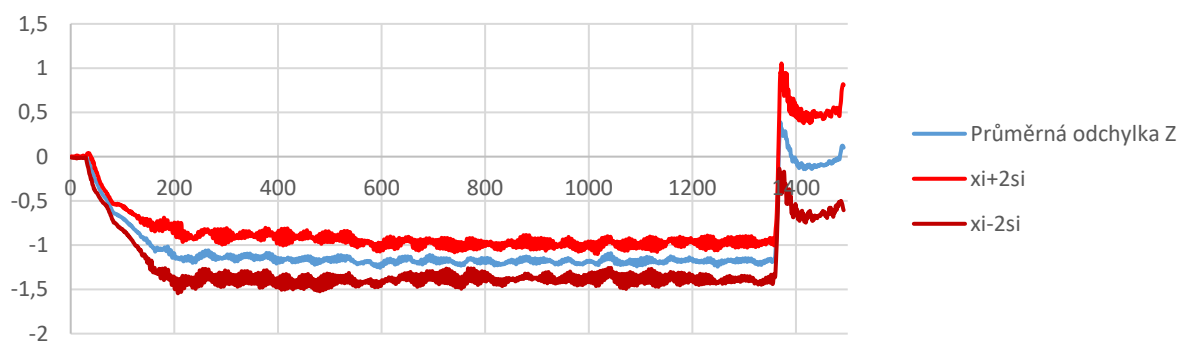
A3 Průměrná odchylka X + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



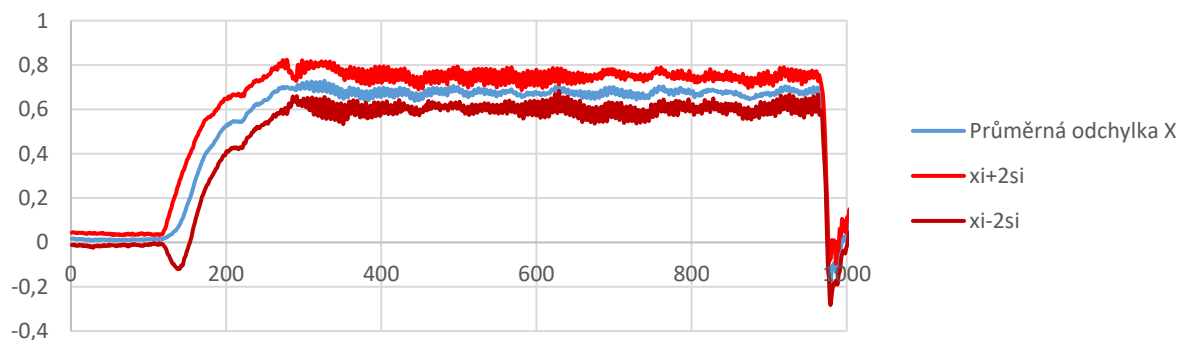
A3 Průměrná odchylka Y + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



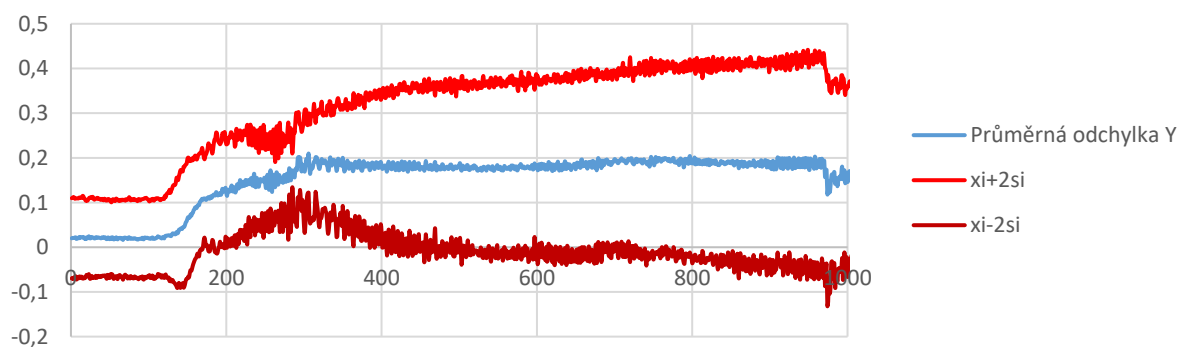
A3 Průměrná odchylka Z + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



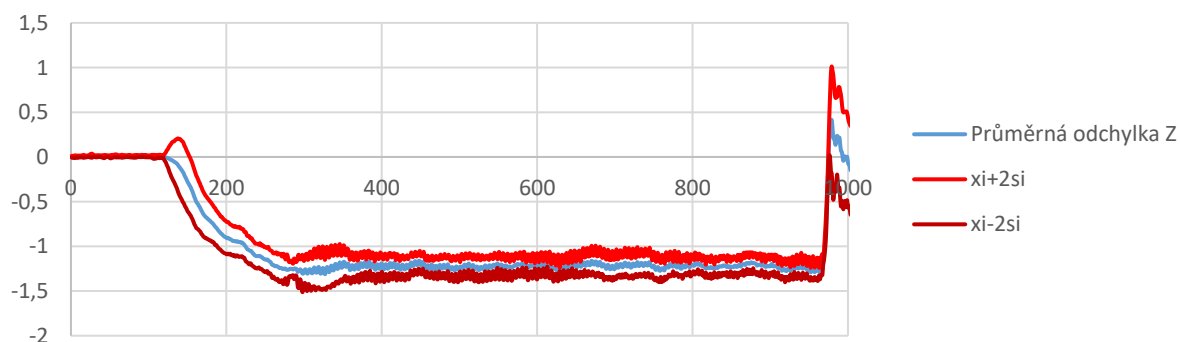
A4 Průměrná odchylka X + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



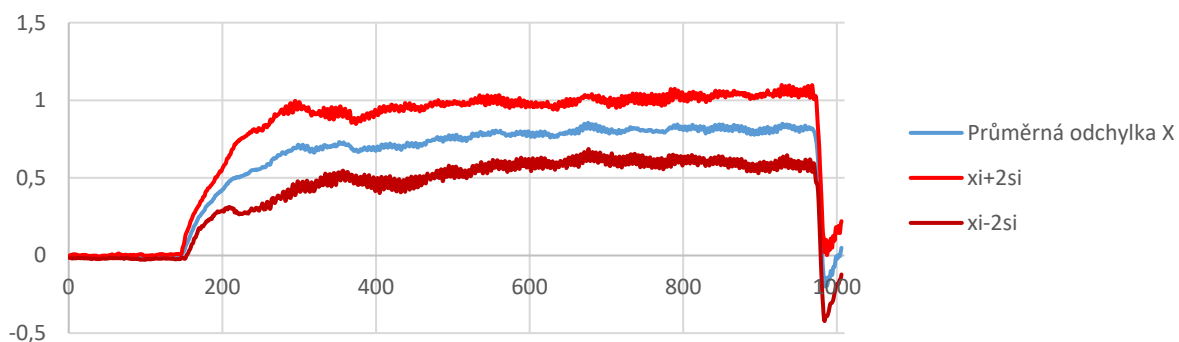
A4 Průměrná odchylka Y + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



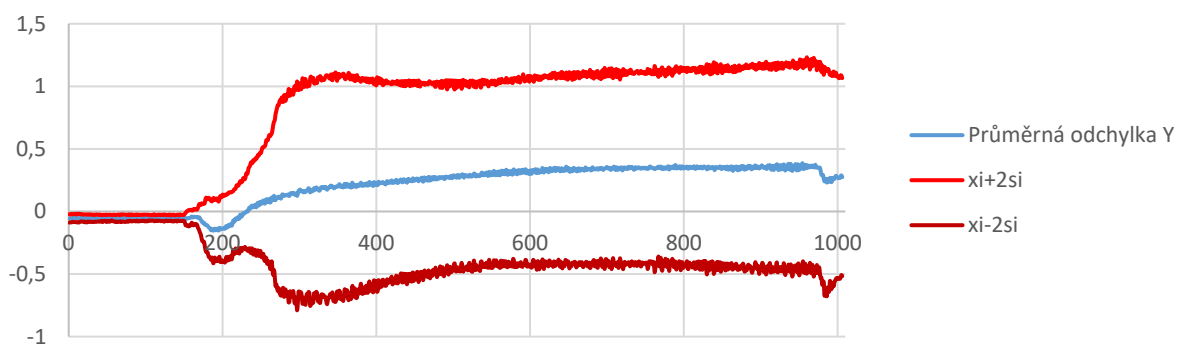
A4 Průměrná odchylka Z + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



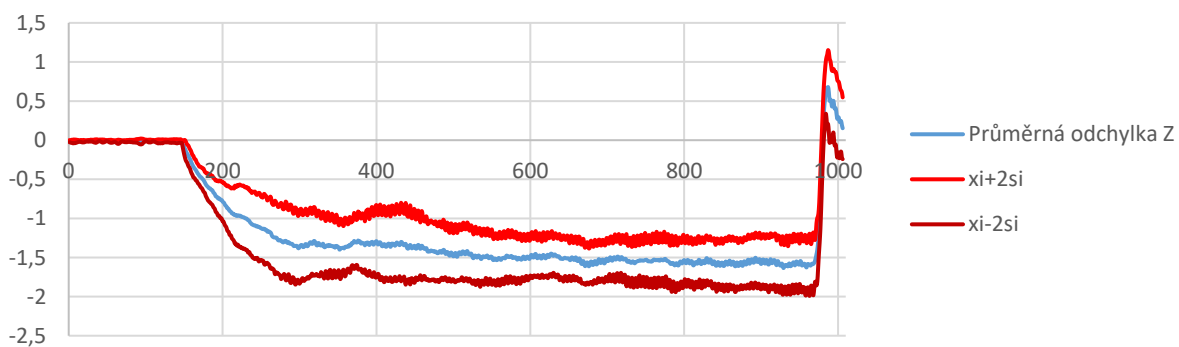
A5 Průměrná odchylka X + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



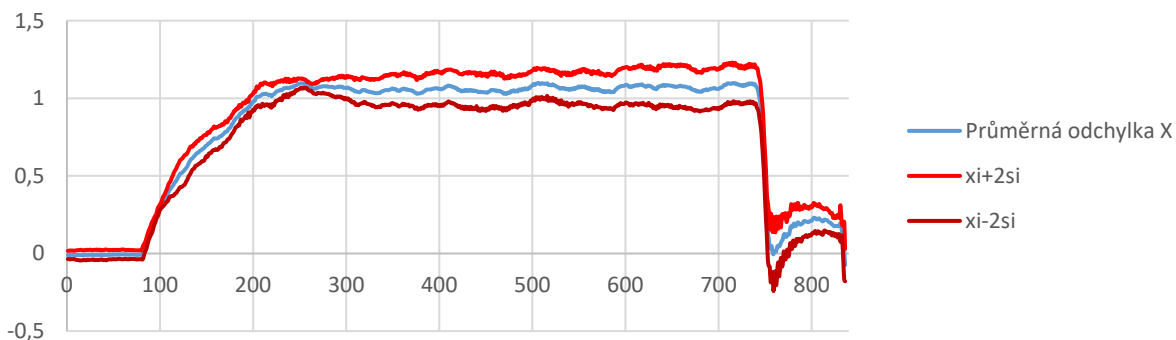
A5 Průměrná odchylka Y + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



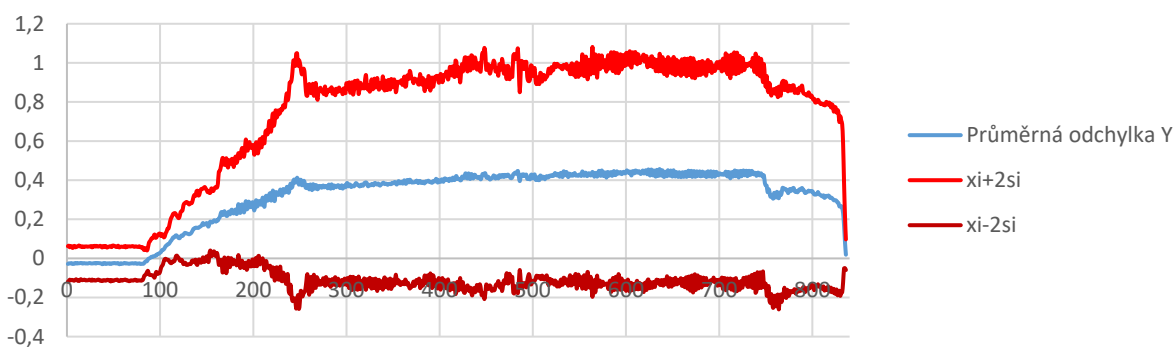
A5 Průměrná odchylka Z + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



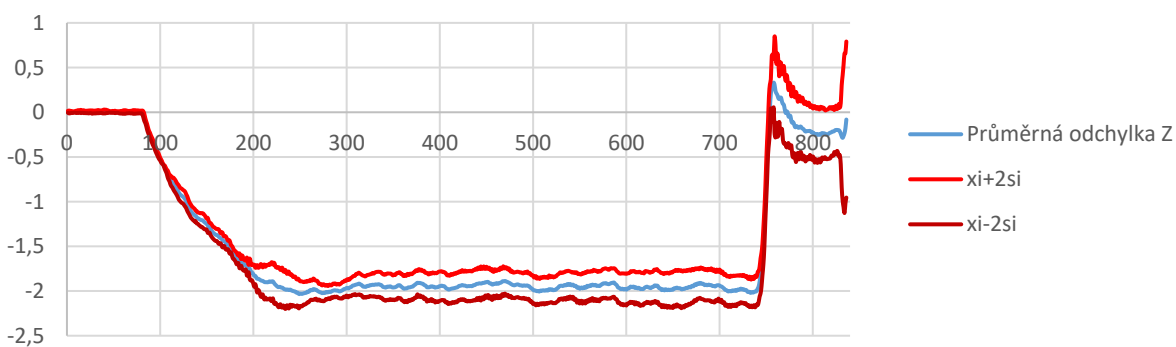
A6 Průměrná odchylka X + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



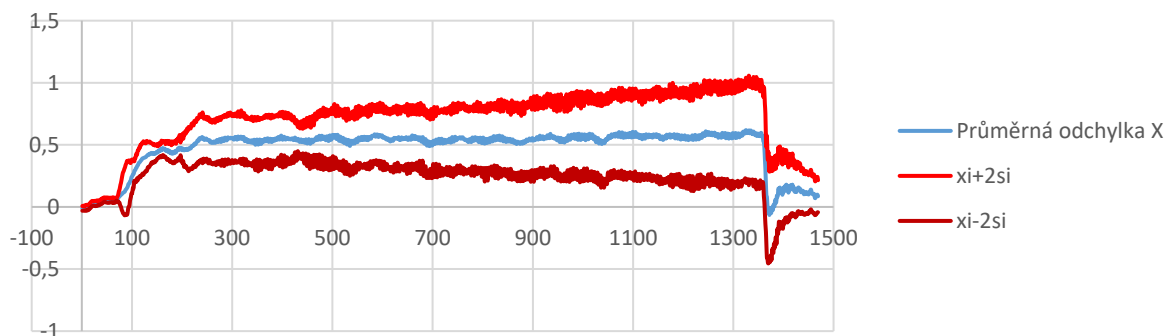
A6 Průměrná odchylka Y + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



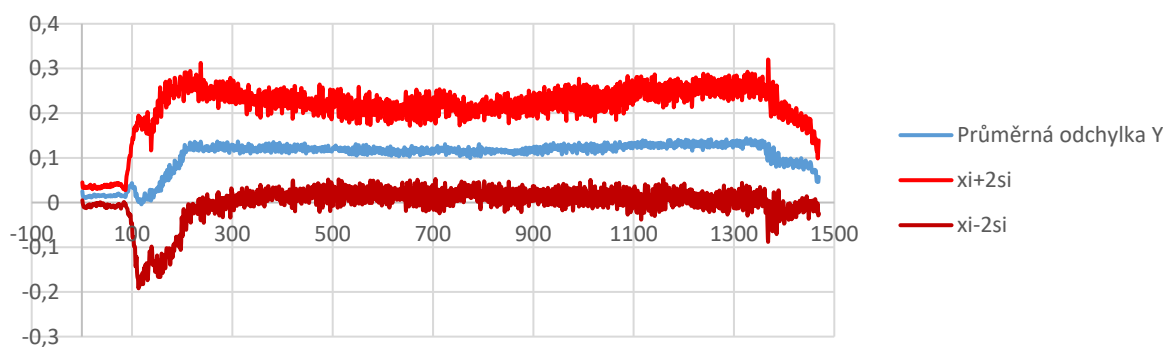
A6 Průměrná odchylka Z + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



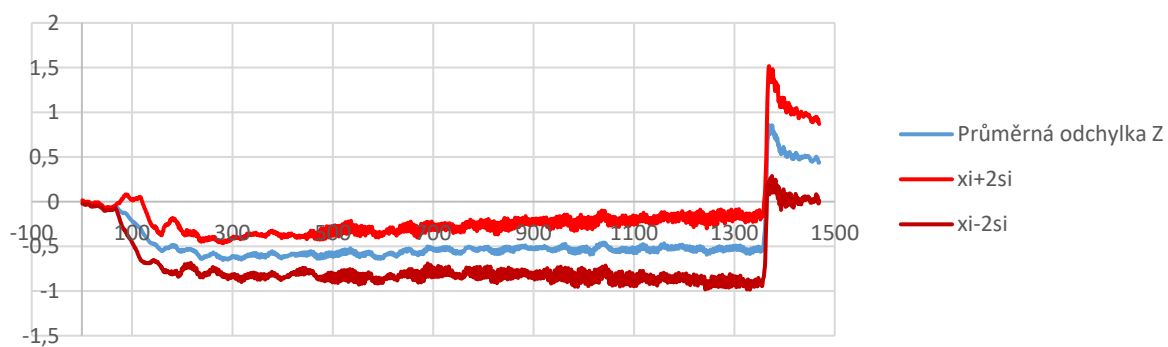
B3 Průměrná odchylka X + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



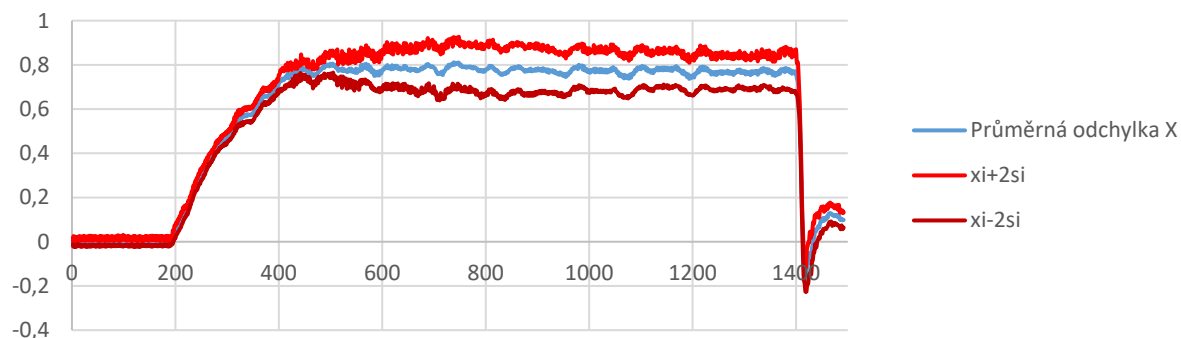
B3 Průměrná odchylka Y + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



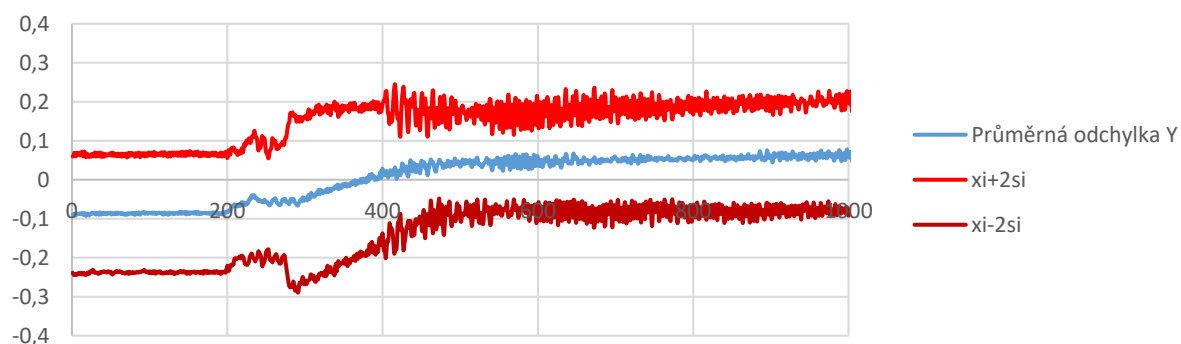
B3 Průměrná odchylka Z + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



C3 Průměrná odchylka X + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



C3 Průměrná odchylka Y + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky



C3 Průměrná odchylka Z + hranice 95,45% pravděpodobnosti výskytu odchylky

